DETECCION DE LA MASA DE LOS NEUTRINOS • TRAS LA PISTA DE UN NUEVO VIRUS

INVESTIGACION y CIENCIA

OCTUBRE 1999
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



- Hablar con el ordenador
- Camaleones informáticos
- Computación flexible



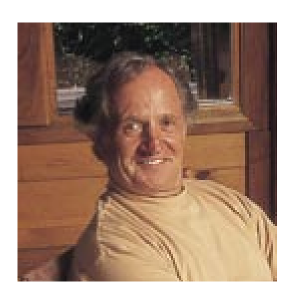
El futuro de la computación se está creando en el M.I.T.



INVESTIGACION y CIENCIA

Octubre de 1999 Número 277

SECCIONES

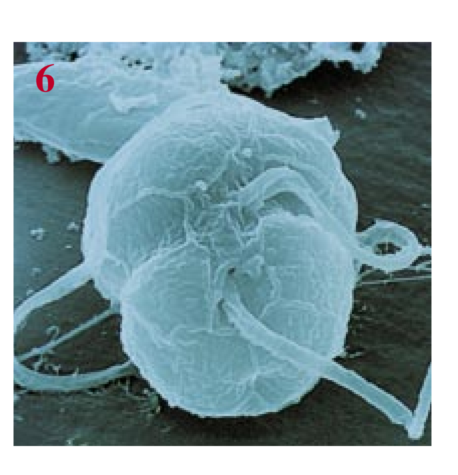






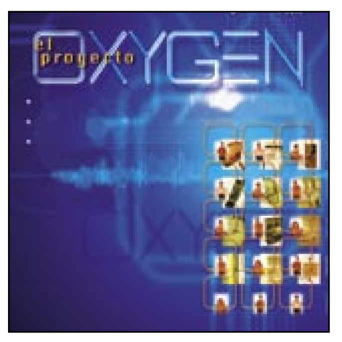


El Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT tiene un plan al que llaman Oxygen: un ambiente informático más eficiente y servicial, donde el procesamiento electrónico de información se halle disponible siempre y sea tan ubicuo e invisible como el aire. Sus creadores ofrecen un anticipo del posible funcionamiento de Oxygen.



Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES



Portada: Imagen de Draper Design
Fotografías de Dan Wagner

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Universidad estatal de Carolina del Norte, Dpto. de Botánica (*abajo a la izquierda*); Dpto. de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Carolina del Norte (*abajo a la derecha*); Laurie Grace (*arriba*)
8-9	Roberto Osti; Micrografías cortesía del Dpto. de Botánica (N.C.S.U.)
10	Dpto. de Botánica (N.C.S.U.)
12	Kevin Schafer (*fotografía de la izquierda*); Dpto. de Botánica (N.C.S.U.) (*derecha*)
14	Jeffrey J. Springer (N.C.S.U.)
15	Jeffrey J. Springer (N.C.S.U.) (*izquierda*); Howard B. Glasgow, Jr. (N.C.S.U.) (*derecha*)
16-17	David Fierstein (*fondo página*); ICRR, Universidad de Tokio
18	ICRR, Universidad de Tokio
19	David Fierstein
20-21	Laurie Grace (*arriba*); Heidi Noland (*dibujo inferior*); AIP Emilio Segre Visual Archives (*Pauli y Reines*); Cortesía del Instituto de Estudios Avanzados, Princeton (*Davis*); David Malin (*SN1987A*); ICRR (*Super-Kamiokande*)
22	Laurie Grace
26-27	Mike Greenlar (*arriba, izquierda*); Jim Noelker (*arriba, derecha*); Nancy Richmond (*abajo, izquierda*); Elizabeth Crews (*abajo, derecha*)
28	Edward Bell; fuente: Anne Colby
30	Edward Bell; fuente: Thomas M. Achenbach y Catherine T. Howell
31	Bob Daemmrich
32	Jeff Greenberg
48-49	Slim Films
50	Cortesía de la Organización para la Defensa de Misiles Balísticos (*arriba*); Theodore A. Postol (*abajo*)
51-52	Slim Films
53	Slim Films; fuente: Theodore A. Postol
55-60	Daniel H. Sandweiss, Asunción Cano, Bernardino Ojeda y José Roque
62-69	Chris Brown, *SABA*
71	Tom Draper Design; Steve Vidler; Derek Trask; Leo de Wys; Dan Wagner
73	Tom Draper Design; fotografías de Dan Wagner
77	Tom Draper Design; fotografías de P. Broze
79	Tom Draper Design; Michelle Tcherevkoff (*televisión*)
81-82	Tom Draper Design
84-85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Emma Cebrián: *La escondida agresividad de* Pfiesteria; Juan Pedro Campos: *Detección de la masa de los neutrinos*; José Manuel García de la Mora: *El desarrollo moral de los niños*; J. Vilardell: *El sistema de defensa antimisiles, Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Juan Carlos Rodríguez Rubio: *Tras la pista de un virus nuevo*; Luis Bou: *El futuro de la computación, Computación Raw* y *Juegos matemáticos*; A. Garcimartín: *Hablar con el ordenador, Camaleones de las comunicaciones* y *Perfiles*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

Ciencia y sociedad:

Juan Pedro Adrados: *Chip de cubits*; Joandomènec Ros: *Aerodinámica*; Nicolás García Tapia: *La traza reencontrada*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.150 pta.	20.700 pta.
	67,01 euro	124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

PESTE BLANCA. «Para encontrar una base fisioquímica concreta de la virulencia tuberculosa, acometimos un estudio comparativo de las cepas virulentas y no virulentas de los bacilos de la tuberculosis, con la esperanza de poder así reconocer algunas diferencias específicas correlacionadas con la capacidad para causar la enfermedad. Ese planteamiento comparativo podría conducirnos a la identificación de las estructuras o propiedades peculiares que facilitan el establecimiento de los bacilos de tubérculo, su multiplicación y los daños que causan en nuestros tejidos.—René J. Dubos»

PLANCTON MICENA. «Nos agradaría creer que en las inmensas y recién exploradas reservas orgánicas de los mares se halla parte de la solución al cada vez más agudo problema de la alimentación mundial. Ultimamente hemos tenido noticia de algunas propuestas altamente esperanzadoras, tales como que la explotación del mar mediante abonos podría multiplicar la producción de pescado. Hay quien sugiere hacer "cosechas" de plancton para emplearlo como alimento. No es un comestible atractivo, pero es nutritivo y elaborándolo adecuadamente podría resultar aceptable. Sin embargo, obtener por tamizado cantidades importantes de tan diminutas criaturas requeriría una enorme inversión en energía. Por ahora habrá que dejar el plancton a los peces.»

...cien años

LAS AGUAS RESIDUALES DE CHICAGO. «Si no se tuercen las cosas, en diciembre las aguas del lago Michigan hallarán una nueva salida al mar a través de un canal artificial hasta el río Illinois y el Mississippi. Este canal de desagüe de Chicago (*llamado ya Canal Sanitario y de Navegación de Chicago*) figurará sin duda entre las obras de ingeniería monumentales de este siglo. Fue proyectado como solución drástica del problema de la evacuación de las aguas residuales de la ciudad de Chicago. El plan contemplaba la apertura de un gran canal de más de 55 kilómetros de recorrido y verter en tan vasta zanja de avenamiento las aguas residuales de la ciudad.»

LA ÚLTIMA DE SU TRIBU. «A setenta millas de la costa de California se encuentra la isla de San Nicolás, pequeña, desolada y barrida por el viento. Allí, durante más de veinte años, lo bastante para olvidar a su gente y su lengua, vivió la mujer salvaje de San Nicolás, Maria Better Than Nothing. Hace menos de cien años, los franciscanos se llevaron a tierra firme a los nativos, una raza de robustos marineros que dejaron sus monumentos en grandes apilamientos y túmulos de conchas que cubren muchas hectáreas, con el ánimo de convertirlos. Pero no a ella. Veinte años después, un sacerdote, a bordo de una pequeña goleta llamada 'Better Than Nothing', la encontró sentada en una choza de broza y vistiendo plumas de pájaros. La civilización se probó desastrosa para ella y murió al cabo de tres meses. Hoy el único habitante de la isla es un pastor.»

CÁCTUS GIGANTE. «EL cactus es un género de planta que medra en lugares cálidos y rocosos. Su piel, dura e impenetrable, encierra un jugo abundante que le permite dar soporte a una perezosa acción vital, sin inconvenientes incluso en suelos agostados. Nuestra fotografía fue tomada por Mr. A. Messinger, reconocido fotógrafo de panoramas de Phoenix (Arizona). La planta, de unos doce metros de altura, sigue en pie, pese a que se está pudriendo lentamente y no tardará en caer. Se encuentra a unos trece kilómetros al sur de Phoenix, junto a la Reserva de Pima.»

Cactus gigante de Arizona

...ciento cincuenta años

MINEROS INDIOS. «En 1844 se descubrió en las minas de cobre de Eagle River, cerca del lago Superior, que los aborígenes habían extraído metal de los filones y fabricado cuchillos y puntas de lanza con el cobre en láminas que obtenían. El famoso doctor Jackson investigó en casi todas las minas y descubrió mazas de piedra indias. En una interesante descripción ante la última reunión de la Asociación Científica Americana, afirma que los útiles de minería hechos de piedra revelan su auténtico origen chippewayano y que son como los que usaron los indios norteamericanos antes de la llegada de los europeos. Se mostró convencido de que la mayoría de los filones ahora explotados por mineros europeos y americanos eran conocidos y trabajados por los pieles rojas, cientos si no miles de años antes de que América fuera descubierta por Colón.»

La escondida agresividad de *Pfiesteria*

Se le acusa de provocar la muerte en masa de los peces y de atentar contra la salud en humanos. Pero su poder dañino es mucho más insidioso e inquietante

JoAnn M. Burkholder

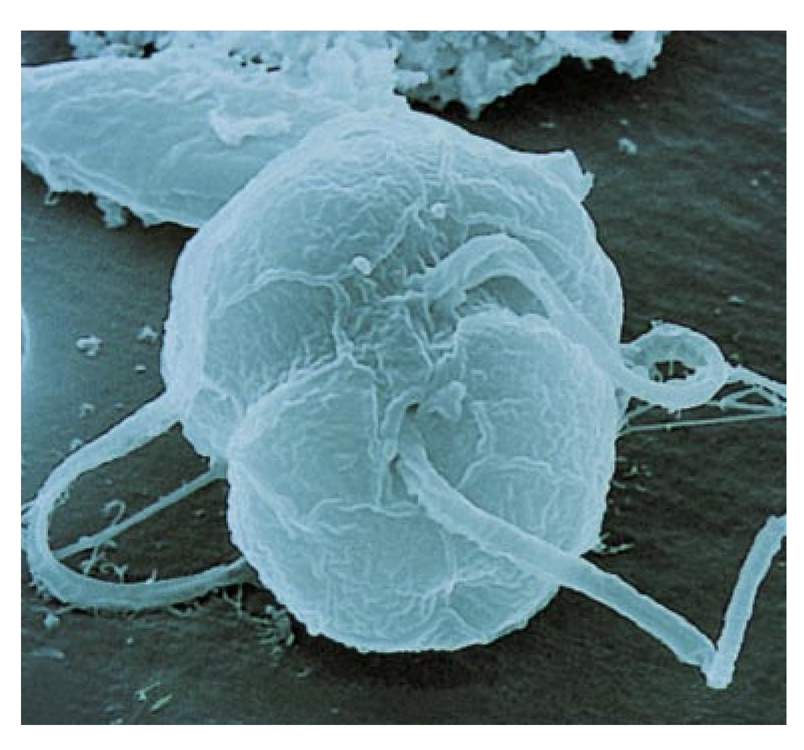
Era una tarde calurosa y húmeda de octubre de 1995. De pie en la embarcación, que se mecía suavemente, observé una masa ingente de peces sangrientos y moribundos que rompían la superficie cristalina del estuario de Neuse. En ese recodo de Carolina del Norte el curso dulce del río Neuse se mezcla con el agua salada del Atlántico. Los peces ascendían a la superficie del río, retorciéndose y luchando para respirar, hasta que quedaban inmóviles, flotando sobre un costado. Predominaban lachas tiranas, de corta talla, que sirven de alimento a otras especies mayores de interés pesquero. Algunas platijas ocasionales, roncadores o anguilas también se debatían en la superficie. Las gaviotas se alineaban en la orilla de la zona afectada, que cubría unos 95 kilómetros cuadrados. Se prometían un festín.

Con mi equipo de la Universidad estatal de Carolina del Norte, recogía muestras de agua de la zona con el propósito de establecer el motivo de la mortandad. Las llagas sangrientas y su errático comportamiento apuntaban hacia un posible brote tóxico de *Pfiesteria piscicida*, un microorganismo unicelular que habíamos observado en 1989 y que asociaríamos luego con la muerte de peces en diversos estuarios. En esta ocasión el desastre alcanzó notables proporciones; quince millones de cadáveres plateados tapizaban el agua.

Terminamos en seguida el muestreo y levamos ancla. No convenía demorarse si *P. piscicida* era la culpable, lo que confirmaron después nuestros resultados. Cuantos habían entrado en contacto con las formas o estadios tóxicos de *Pfiesteria* sufrieron luego náuseas, problemas respiratorios y pérdidas de memoria tan graves, que a veces se atribuyeron a la enfermedad de Alzheimer.

La escena en el río nos resultaba familiar. En 1991 habían muerto de idéntico modo mil millones de peces en el estuario. Desde entonces, *P. piscicida*, sola o con la ocasional compañía de otra especie tóxica emparentada, se ha visto involucrada en mortandades anuales de peces en la bahía de Chesapeake.

Estas dos especies, la segunda todavía sin bautizar, constituyen los pri-





JOANN M. BURKHOLDER, autoridad mundial en *Pfiesteria*, enseña botánica en la Universidad estatal de Carolina del Norte.

meros miembros del “complejo tóxico *Pfiesteria*”. Con el nombre del género las aludiremos en adelante. Ambas, u otras afines que esperan identificación, han aparecido recientemente en ensenadas y estuarios de la costa atlántica, desde Delaware hasta el golfo de Alabama. Sin embargo, no se las ha vinculado con la muerte de peces fuera de Carolina del Norte y Maryland.

En mi departamento llevamos diez años dedicados al estudio del ciclo biológico de *Pfiesteria*, causas de su proliferación y desencadenamiento de los brotes tóxicos. Nos hemos encontrado con un organismo singular, cuyas propiedades jamás se describieron entre los dinoflagelados, grupo de microorganismos que lo incluye. Bajo el paraguas de los dinoflagelados se amparan miles de especies; y reciben ese nombre por los látigos o flagelos apendiculares que les sirven para nadar en ciertos estadios de su vida.

Descubrimos que la agresividad de *Pfiesteria* no se detiene en la muerte simultánea de muchos peces. Debilita la salud de crustáceos y peces de una manera harto insidiosa. Arruina su capacidad reproductora y su sistema inmunitario. Estos efectos menos llamativos podrían mermar las poblaciones de peces de un modo más permanente que los episodios de grave mortandad.

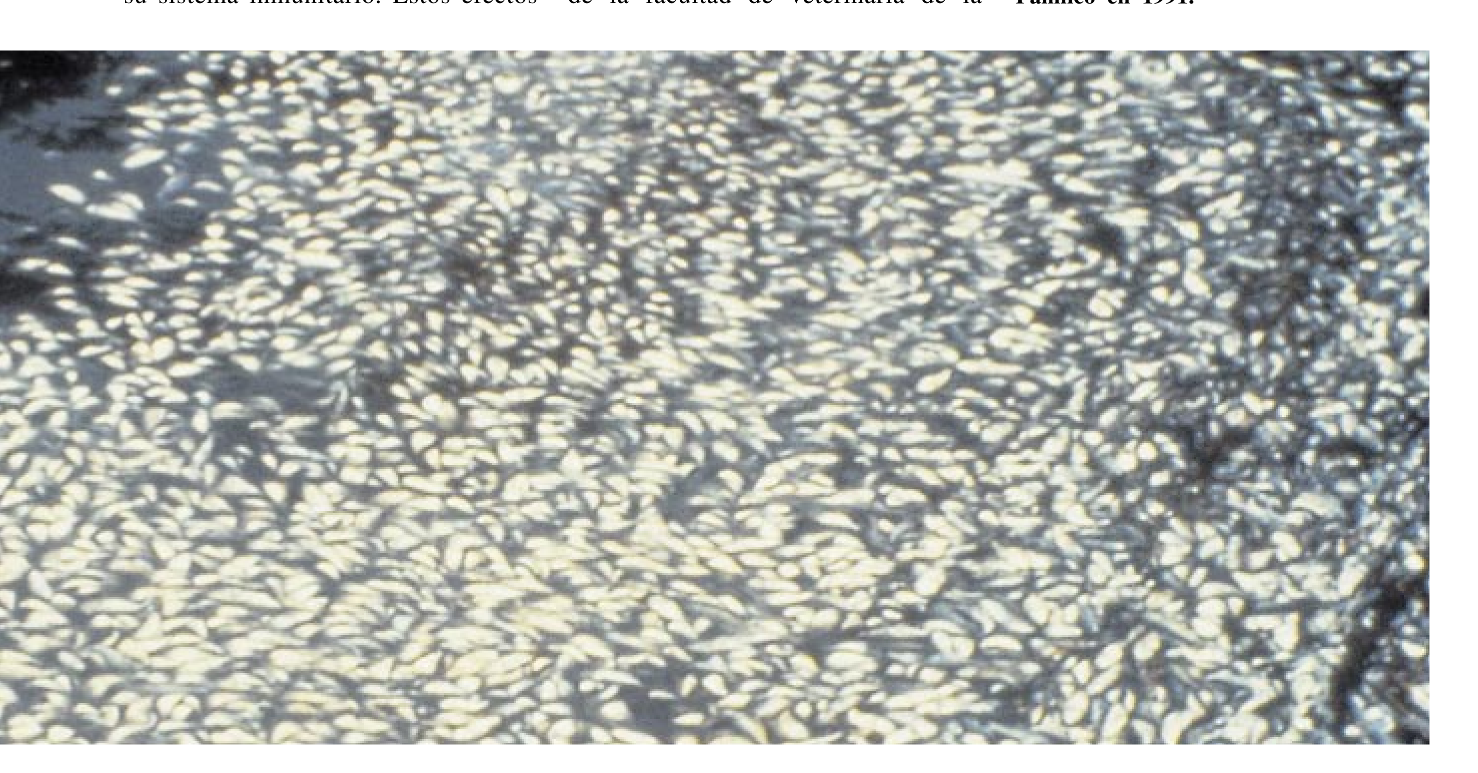
Pfiesteria no está sola en su silenciosa perfidia. La ciencia ha ido conociendo actividades malignas de otras “algas dañinas”, ecléctica categoría, o cajón de sastre, que abarca desde algas genuinas hasta *Pfiesteria* y otros microorganismos unicelulares. (Las algas son plantas primitivas que sintetizan clorofila y se sirven de la fotosíntesis para fabricarse su propio alimento.) Las “algas dañinas” pueden atentar contra los peces en la época de la multiplicación de aquéllas, cuando producen niveles peligrosos de toxinas o proliferan tanto, que agotan el oxígeno del agua, con la asfixia consiguiente de los peces.

Hay algas de ésas que no sólo esquilman la comunidad de peces, sino que envenenan también a los animales y las personas que consumen marisco o agua tóxicos. A ciertos dinoflagelados, parientes próximos de *Pfiesteria*, hemos de atribuir las mareas rojas que han teñido y envenenado las aguas del mundo entero durante miles de años. Pero habrá que sacar a la luz, asimismo, otros efectos menos manifiestos de las algas dañinas, si queremos evitar nuevos episodios de mortandad de peces y agresiones contra el hombre.

La primera vez que se asoció *Pfiesteria* con la muerte de peces fue en 1988, en los estanques salobres de la facultad de veterinaria de la



1. A *PFIESTERIA PISCICIDA* (*microfotografía de la página opuesta*) y otra especie estrechamente afín se les considera responsables de la mortandad de peces en los estuarios de Carolina del Norte y Maryland. Pero esas especies, integrantes del “complejo tóxico *Pfiesteria*”, poseen un área de distribución mucho mayor. Desde Delaware hasta el golfo de Alabama se han visto miembros de este complejo, o microorganismos muy similares aunque todavía sin identificar. La primera mortandad atribuida a *Pfiesteria* ocurrió en el estuario de Pamlico en 1991.



Ciclo biológico

EN PRESENCIA DE PECES...

Y EL AGUA ES SALOBRE, CALMADA Y FRIA*
(entre 12 y 15 grados Celsius)

PECES RECIEN LLEGADOS

TOXINA

Excrementos y secreciones denuncian la presencia de los peces

Los peces mueren y acaban en el fondo

PECES MUERTOS

Las amebas se alimentan de peces muertos

AMEBA

ALIMENTO

Y EL AGUA ES SALOBRE, CALMADA Y CALIENTE†
(A partir de 26 grados Celsius)

PECES RECIEN LLEGADOS

TOXINA

Los peces enferman

PECES HERIDOS

Excrementos y secreciones denuncian la presencia de los peces

ZOOSPORA TOXICA

Replicación de las células

GAMETOS

Células que se alimentan de material proveniente de los peces

ZOOSPORAS NO TOXICAS

PLANOZIGOTO

LLAGAS

Peces muertos y hundidos en el fango

AMEBA

Las amebas cambian de forma y se alimentan de los peces muertos

CISTES

Amebas que se alimentan de peces muertos

PECES MUERTOS

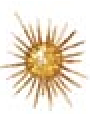
*Los descubrimientos en agua fría están basados en tests y en acuicultura.

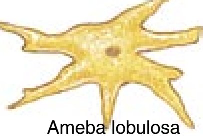
†Estas son las condiciones típicas durante la depredación en la naturaleza.


Ameba estrellada grande


Ameba estrellada mediana


Ameba estrellada pequeña

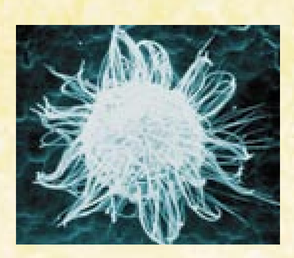

Ameba rizopodial


Ameba lobulosa grande


Ameba lobulosa mediana


Ameba lobulosa pequeña


AMEBA LOBULOSA


CISTE ESCAMOSO NUEVO

Pfiesteria piscicida consta de una sola célula. Carente de pigmentación, puede tomar 24 formas diferentes, por lo menos, algunas de las cuales se muestran en el diagrama simplificado y en las microfotografías. La forma y tamaño que adopte dependerá del tipo de presa y cuantía depredada, así como de las condiciones ambientales. Su tamaño oscila entre cinco y 750 micras.

En su medio natural, las células se transforman en tóxicas cuando los peces corretean por su territorio. En la estación cálida, la llegada de peces en número abundante (*panel de arriba, derecha*) activan la transformación de *P. piscicida*. Antes de que los peces entren en escena, las células preexisten en cualquiera de las tres formas básicas: amebas amorfas que engullen parsimoniosamente a otras presas de los fondos fangosos, cistes celulares de tamaño diverso que hibernan protegidas por una corteza exterior resistente y células nadadoras benignas, las zoosporas no tóxicas. Con el advenimiento de los peces, las zoosporas no tóxicas se transforman en tóxicas (*las flechas indican cambios de estado*). Con una rapidez que oscila entre minutos y horas, cistes y amebas se transforman en zoosporas no tóxicas, que también se convierten muy pronto en tóxicas. Luego, estas zoosporas reconvertidas liberan toxinas muy potentes al agua y dibujan un rimero para los peces.

Las toxinas drogan a los peces y degradan su piel. Con ello facilitan la acción agresora de bacterias y hongos morbígenos. Mientras, las zoosporas tóxicas se reproducen asexualmente; producen también gametos, de cuya fusión resultan los planozigotos, células nadadoras. Los peces sufren graves ulceraciones. Zoosporas tóxicas, planozigotos y gametos se alimentan de las sustancias procedentes de las llagas y de las tiras de piel desprendidas, ingiriendo este material por succión. Muertos los peces, habrá células que cambien a

singular de *Pfiesteria*

EN AUSENCIA DE PECES...

Y EL AGUA ES SALOBRE, CALMADA Y RICA EN OTROS ALIMENTOS
(microorganismos o compuestos orgánicos de aguas residuales u otras fuentes)

NUTRIENTES DISUELTOS

ZOOSPORA TOXICA
(de alguna muerte reciente)

GAMETOS

Amebas flotantes

ZOOSPORAS NO TOXICAS

PLANOZIGOTO

Células alimentadas hasta la saciedad

Replicación celular

CISTE

Replicación celular

CISTES

Y LAS AGUAS SON TURBULENTAS O ESCASEA EL ALIMENTO

AMEBA

PLANOZIGOTO

ZOOSPORA TOXICA

GAMETOS

Las células se transforman en amebas si el agua es caliente; en cistes, si turbulenta

Replicación celular

El dibujo no está a escala

Ciste homozigótico

Ciste pequeño y áspero

Ciste grande y áspero

Ciste escamoso nuevo

Zoospora no tóxica

Zoospora tóxica

Gametos

Planozigoto

Alimento (microorganismos y materia orgánica disuelta y particulada)

la forma ameboide, adhiriéndose a los restos de los peces para comérselos.

Por ensayos de laboratorio y observaciones en estaciones de acuicultura, sabemos que los peces no están a salvo tampoco en aguas frías (*panel izquierdo de la página opuesta*). Las grandes amebas instaladas en el suelo de los estanques atacan prestas, matan y comen los peces introducidos en el sistema.

Cuando los peces moribundos desaparecen del agua, pero abundan otros nutrientes, presas algales por ejemplo, entonces gametos y zoosporas tóxicas se convierten en zoosporas no tóxicas (*panel izquierdo, arriba*). En el ínterin, algunas células pueden convertirse en amebas o hipnozigotos (un tipo de ciste). Las amebas y los cistes del fondo fangoso pueden producir más zoosporas no tóxicas. En el agua, las zoosporas no tóxicas se alimentan y se multiplican, pero adquieren presto la condición de atacante tóxico cuando aparece un nuevo cardumen.

En aguas pobres en nutrientes (*panel derecho, arriba*) las células flageladas pueden optar por buscar fortuna constituidas en amebas carroñeras del fango. Si se da una persistente turbulencia, células nadadoras y amebas se convertirán en cistes hibernantes, preparados para resistir condiciones adversas. En condiciones de laboratorio, el veinte por ciento sobrevivieron incluso después de dejarlos en seco durante 35 días, sumergiéndolos en una base o ácido concentrado durante 30 minutos o manteniéndolos en lejía durante una hora.

La oportunista consumada que es *P. piscicida* no se detiene ni ante el robo. No está capacitada para realizar la fotosíntesis por sí sola. Pero mediante un proceso de cleptocloroplastidia, las zoosporas se valen de los cloroplastos (orgánulos fotosintéticos) de algas que se han comido; los usan días o semanas para generar energía.

—*J.M.B.*



AMEBA FILAMENTOSA



ZOOSPORA TOXICA

Universidad de Carolina del Norte. En un estaque tras otro, los peces morían de un mal misterioso. Los veterinarios fijaron la atención en un microorganismo nadador. Observado al microscopio, dedujeron que se trataba de un dinoflagelado. Vieron luego que su número abundaba en los acuarios justo antes de que murieran los peces, para desaparecer tras la mortandad. Reaparecían si se reintroducían peces vivos en los estanques.

A ese laboratorio llegaban para su estudio peces de todo el mundo; nadie sabía de dónde provenía el organismo, ni si la ciencia conocía la especie en cuestión. En 1989 se nos pidió al departamento de botánica de la universidad si podíamos identificar el microorganismo y establecer su responsabilidad en la muerte de los peces.

La naturaleza del adversario

Nos dimos cuenta muy pronto de la naturaleza singular del sujeto entre los dinoflagelados, tóxicos o no. Adopta formas o estadios que no se parecen en nada a los del resto del grupo. En esos estadios se acerca más a los crisófitos, microorganismos también. *Pfiesteria* se aparta, asimismo, de los dinoflagelados tóxicos, un grupo restringido de unas 60 especies que poseen algunos de los más potentes venenos de la naturaleza, aunque su finalidad no acaba de verse. En cambio, los microorganismos recién descubiertos no sólo envenenaban a los peces, sino que también se los comían.

Mi equipo descubrió que este microorganismo singular, al que acabaríamos por llamar *Pfiesteria piscicida*, no era tóxico en un medio exento de peces. Mas en cuanto percibía los excrementos y las secreciones de esos vertebrados en el agua, empezaba a segregar toxinas y se encaminaba hacia los desperdicios de los peces. Las toxinas deterioraban la piel de los peces, dañaban el sistema nervioso y los órganos vitales y los hacía entrar en un estado letárgico. Sin fuerzas para moverse, los peces quedaban luego a merced de otros microorganismos; donde la piel se había desprendido se formaban llagas sanguinolentas.

Con los peces sin fuerzas para moverse, las células dinoflageladas se alimentaban de la piel desprendida, sangre y otras sustancias que emanaban de las heridas. Aquellas células letales transformaban sus formas flageladas y nadadoras en formas ameboides y amorfas, que se comían los restos de las víctimas; se henchían tanto, que no podían ni desplazarse.

En sus estadios tóxicos, *P. piscicida* se convierte en asesino muy eficaz. De acuerdo con lo observado en ensayos de laboratorio, el agua o cultivos contaminados por las toxinas de las células matan especies de peces y crustáceos muy diversas. Howard B. Glasgow, Jr., ha comprobado que los alevines, igual que los adultos de las especies más sensibles, expiran minutos después de la exposición a las toxinas; la mayoría de las víctimas, en un intervalo de horas.

Hemos descubierto también una propiedad de la que nunca se había hablado en otros dinoflagelados tóxicos. A lo largo de su ciclo biológico *P. piscicida* puede atravesar 24 estadios diferentes, por lo menos. Altera forma y tamaño según las fuentes de alimento disponibles; abarcan éstas desde bacterias hasta tejidos de mamíferos, en la cúspide de la cadena trófica. En algunas de estas transformaciones se multiplica por 125 el tamaño preexistente, en procesos que apenas tardan 10 minutos.

Dos años estuvimos estudiando *Pfiesteria* en los estanques del acuario sin conocer su procedencia. Pero la información recopilada en nuestro país nos preparó para la búsqueda. Empezamos por lo más inmediato. Desde mediados de los ochenta, cada año se producían mortandades de peces en los estuarios de Albemarle-Pamlico, donde desemboca el río Neuse. Con la ayuda de biólogos de la región, obtuvimos muestras de agua en 1991, durante un episodio que acabó con un millón de lachas tiranas en el estuario de Pamlico.

El adversario en la naturaleza

Cuando examinamos las muestras con el microscopio electrónico de barrido, observamos minidinoflagelados muy parecidos a los contemplados en los acuarios de la escuela de veterinaria. Se volvió a repetir el patrón de nuestros estanques, a saber, que las células se esfumaban tras la matanza: no las había en muestras de agua recogidas entre los restos flotantes de los peces, un día después de su muerte. Este trabajo no sólo nos llevó hasta el contaminante de la escuela de veterinaria, sino que puso también de manifiesto la participación de *Pfiesteria* en los desastres ocurridos en la naturaleza.

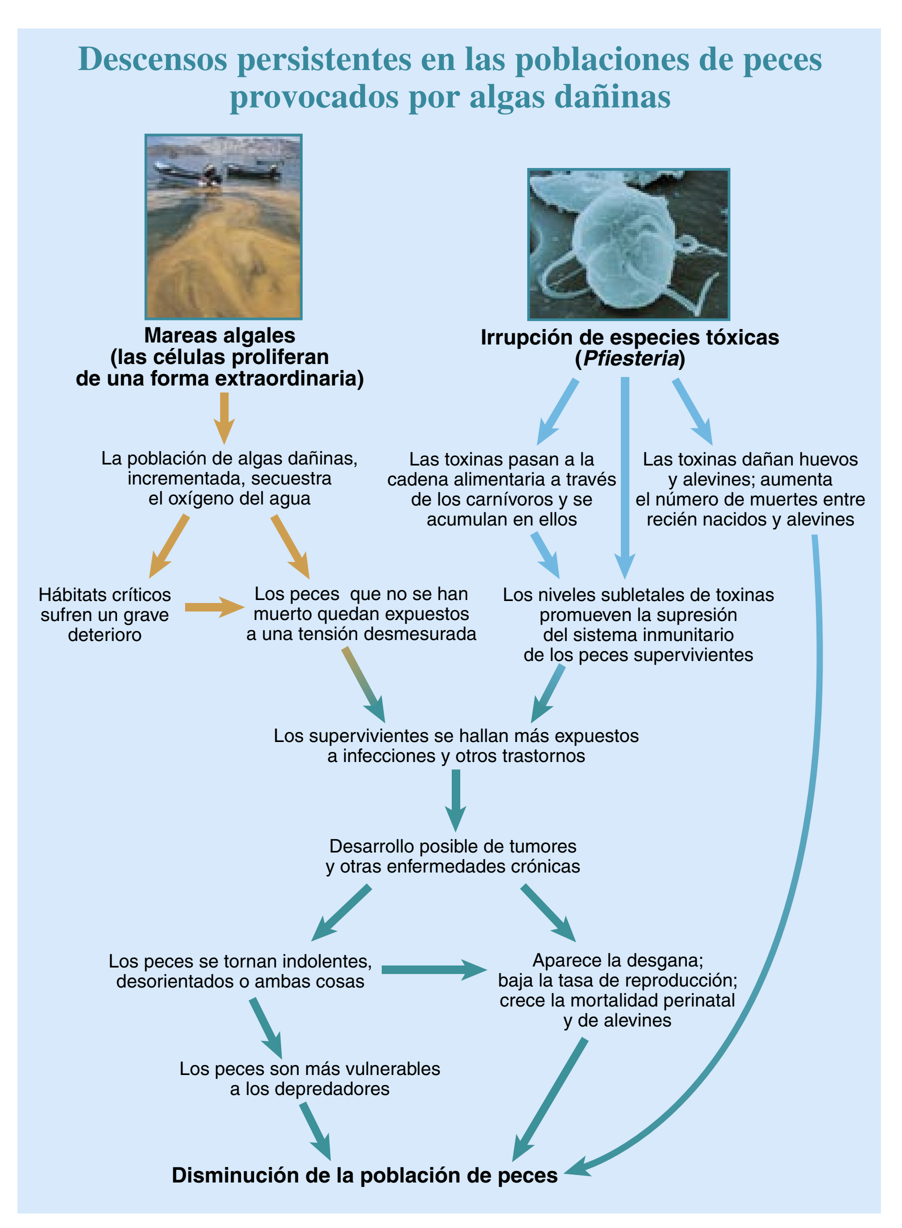
¿Qué es lo que dispara las epidemias tóxicas de *Pfiesteria*? De acuerdo con múltiples experimentos de campo y laboratorio, la sobreabundancia de nitrógeno y fósforo, entre otros factores, facilita tales brotes. Las calmadas aguas someras de muchos estuarios de Carolina del Norte reciben flujos contaminantes procedentes de los aledaños: aguas fecales ricas en nutrientes, abonos, residuos industriales (algunos ricos en fosfatos) y animales (de muchas granjas avícolas y de cerdos que hay en la cuenca). La eutrofización del estuario insta la proliferación algal, igual que las plantas de nuestro alféizar crecen mejor si abonamos el sustrato. Semejante eclosión de algas se convierte en pasto excelente para *Pfiesteria*, que se reproduce y genera legiones preparadas para atacar bancos de peces que se adentran en las aguas infestadas de *Pfiesteria*.

Los estuarios de Carolina del Norte se convirtieron en una trampa mortal con los estragos de *Pfiesteria*. Albemarle-Pamlico es uno de los principales sistemas estuarinos de los Estados Unidos. Ocupan sus en-





2. LOS PECES MUERTOS durante una eclosión de *Pfiesteria* (entendiendo por tal cualquier especie de ese grupo tóxico) presentan llagas sanguinolentas (*izquierda*). A muchos se les puede observar secciones enteras de carne devorada (*derecha*).



3. ADEMAS DE SU PODER LETAL sobre cardúmenes enteros, las algas dañinas se valen de otras artes para atentar contra los peces. A la larga, estos efectos menos patentes resultan más lesivos contra la persistencia de las poblaciones que los episodios de mortandad.

senadas la mitad de la extensión que emplean los peces para cuidar a sus alevines, desde Maine hasta Florida. Muchos alevines acuden a sus aguas para crecer y desarrollarse, antes de emprender su viaje hacia el norte o el sur. Si los peces mueren en masa en esa zona crucial, las poblaciones de las especies afectadas podrían sufrir una peligrosa reducción.

Apenas comprobamos cuán sumamente letal para los peces era *Pfiesteria*, nos dimos cuenta de que sus víctimas no acababan ahí. El hombre puede sentir su aguijón. Los dinoflagelados tóxicos suelen atentar contra la salud humana a través del consumo de marisco emponzoñado. Pero en el caso de *Pfiesteria* las cosas son distintas. De acuerdo con la investigación realizada por el grupo que encabeza Davis P. Green, de la Universidad de Carolina del Norte, las toxinas de *Pfiesteria* no parecen acumularse en los peces; de ello se desprende la escasa probabilidad de que el marisco procedente de aguas contaminadas por *Pfiesteria* sirva de intermediario en la intoxicación del hombre. La vía de envenenamiento es directa: al bañarse en aguas contaminadas con toxinas o al respirar el aire de las zonas donde haya peces atacados por *Pfiesteria*.

Una sorpresa desagradable

Conocimos su incidencia sobre las personas por experiencia propia. Desde el inicio de nuestra investigación cumplimos las normas de seguridad establecidas para trabajar con dinoflagelados tóxicos. Se nos había dicho que el único peligro en el laboratorio era el contacto con agua contaminada. Ignorábamos que *Pfiesteria* produjera una toxina neurológica volátil gravemente peligrosa para las personas. Se trataba del primer dinoflagelado que lo hacía. Nosotros lo estábamos inhalando.

Al principio, los síntomas eran tan sutiles, que los atribuimos a otras causas. De las dificultades respiratorias culpamos al asma; del picor o escozor en los ojos, infección de garganta y problemas similares, a la alergia; de los dolores de cabeza y faltas de memoria, al estrés. Así fue hasta que, cierta tarde de 1992, Howard Glasgow acudió a un pequeño laboratorio donde habíamos estado trabajando tiempo atrás con *Pfiesteria*. Ahora dependía de otro departamento, que no lo había limpiado a fondo. Las paredes tenían una pátina de células tóxicas de *Pfiesteria*. Howard empezó a quitar la suciedad. Apenas transcurridos unos minutos, le empezaron a quemar los ojos y se le entrecortó la respiración. Perdió la coordinación, le flaquearon las piernas y le entraron náuseas. Como pudo, se arrastró fuera del laboratorio. De haber estado en buenas condiciones el laboratorio, no hubiera pasado eso.

Ante la negativa a usar el laboratorio, se construyeron nuevas instalaciones. Se dio por supuesto que contarían con un buen sistema de ventilación. Pero, sin nosotros saberlo, los instaladores bombearon el aire del laboratorio del cultivo tóxico hacia al despacho de Howard. En poco tiempo, su habitual buen humor se transformó en colérico; parecía desorientado e incapaz de concentrarse en la más simple de las tareas. Inteligente y con una agudísima memoria, de repente no podía recordar lo conversado por la mañana. Tras un período de intensivo trabajo de laboratorio, perdió incluso la memoria a largo plazo. No podía recordar el camino de su casa, ni su número de teléfono, ni leer; le costaba hablar. Después de dos meses se recuperó y volvió al trabajo. Pero durante los dos años siguientes, el ejercicio le provocaba recaídas, dolor articular, agarrotamiento muscular y fases de desorientación.

Antes de descubrir que *Pfiesteria* segregaba toxinas volátiles, cayeron enfermas 12 personas de cuatro laboratorios que operaban con cultivos tóxicos. Tres de nosotros, incluida la autora, nos resentimos todavía de algunos problemas que nos trajo el trato con *Pfiesteria*. A lo largo de los seis últimos años he padecido infecciones bronquiales crónicas y 16 brotes de neumonía; para controlar las infecciones me medico con antibióticos unas tres veces al año.

Hemos adoptado normas de seguridad especiales y seguimos protocolos de alto riesgo biológico III, que obligan a tomar más precauciones de las necesarias en investigaciones del virus del sida. El laboratorio está provisto de un circuito cerrado de aire y tiene cámaras de descontaminación. Se trabaja con indumentaria especial y máscaras respiratorias abastecidas con aire limpio.



4. RESPUESTA DE LAS VIEIRAS, tras someterlas a aguas con *Pfiesteria* en el laboratorio. Nos ofrece una prueba clara de la capacidad de *Pfiesteria* para causar daños a largo plazo. Cuando expusimos vieiras sanas (*izquierda*) a densidades subletales de células tóxicas, no pudieron ya cerrar sus valvas (*derecha*); con ello se tornan mucho más vulnerables a la depredación.

Los efectos crónicos en el campo

Las personas expuestas a brotes de *Pfiesteria* en la naturaleza han manifestado los mismos síntomas. Buceadores y pescadores, junto con los que trabajaban en aguas contaminadas o con peces envenenados por *Pfiesteria*, han sufrido, y así consta en su historia clínica, problemas respiratorios, dolores de cabeza, cambios extremos de humor, dolor en las articulaciones y músculos, desorientación y pérdida de memoria.

En 1997, tres episodios de eclosión de *Pfiesteria* provocaron que el gobernador de Maryland cerrara la bahía de Chesapeake varias semanas. Los informes sobre extraños síntomas en las personas que habían estado en las áreas afectadas instaron la intervención del Departamento de Salud e Higiene Mental de Maryland. Entre quienes presentaban los síntomas había pescadores; contaban éstos que llegaban a extraviarse en unas aguas donde habían faenado toda su vida y que perdían el sentido del equilibrio y la concentración. A través de tests neurofisiológicos, el equipo médico dirigido por J. Glenn Morris, Jr., de la Universidad de Maryland, pronosticó "profundas" incapacidades de aprendizaje en los pacientes. La gravedad de su disfunción cognitiva guardaba relación directa con el grado de exposición, y los pacientes recobraron sus facultades al cabo de pocos meses.

Pero los médicos no han podido establecer todavía la diagnosis correcta del "síndrome *Pfiesteria*", por la sencilla razón de que se desconoce la naturaleza exacta de las toxinas implicadas, igual que en otras algas tóxicas. Sin esta información no se puede abordar el comportamiento químico de las toxinas en el cuerpo humano, ni pueden diseñarse tests que las identifiquen definitivamente en la sangre y en los tejidos. Algo se ha avanzado. Peter D. R. Moeller y John S. Ramsdell, del Servicio Oceanográfico Nacional en Charleston, han semipurificado los componentes de las toxinas de *Pfiesteria* que destruyen la piel de los peces y afectan al sistema nervioso de las ratas.

Decidimos prestar más atención a la posibilidad de que *Pfiesteria* causara efectos crónicos en los peces sometidos a exposiciones subletales. En el laboratorio, colocamos los peces ante bajas concentraciones de *Pfiesteria* tóxica; seguíamos su desenvolvimiento a lo largo de tres semanas. Parecían drogados, con descamaciones e infecciones. Nos revelaron los análisis que el número de glóbulos blancos en la sangre había descendido entre un 20 y un 40 por ciento de los niveles normales; observación ésta que inducía a pensar que las toxinas de *Pfiesteria* atacaban el sistema inmunitario y redoblaba la susceptibilidad de los peces a las enfermedades. Las autopsias de los peces afectados revelaron lesiones en el cerebro, hígado, páncreas y riñones.

La inmunidad mermada, las enfermedades redobladas y la periódica mortandad pueden reducir de manera notable las poblaciones. Otros problemas bloquean su capacidad de recuperación. Se ha comprobado que, en presencia de *Pfiesteria* tóxica en el agua, no eclosionan los huevos de róbalos listados y de otros peces de interés comercial. Sandra E. Shumway y Jeffrey J. Springer han demostrado que *Pfiesteria* mata larvas de moluscos, a veces sólo en unos segundos de contacto; en las vieiras jóvenes les priva del poder de cerrar sus valvas y así las deja muy vulnerables a los depredadores.

Una descripción más amplia

Conforme profundizábamos en nuestro conocimiento de la amenaza que *Pfiesteria* supone para las poblaciones de peces, iba tomando consistencia el interés por averiguar si ese fenómeno no formaba parte de una serie de efectos de mayor alcance. De acuerdo con la tesis admitida, ni peces ni moluscos expuestos a dosis subletales de toxinas de algas dañinas sufrirían ningún daño especial. Pero, ¿podían las algas dañinas causar problemas que habían pasado inadvertidos, relacionados tal vez con la reproducción, la supervivencia de los alevines o su sensibilidad o resistencia a las enfermedades? Y en otro orden, ¿planteaban esos organismos permanentes o sutiles problemas sanitarios?

No son muchos los que han explorado estas cuestiones o estudiado la diversidad de efectos que ejercen tales mareas de algas dañinas en el ecosistema. Pero hay señales que despiertan inquietud. De entrada, preocupa la tendencia expansiva de este grupo de algas dañinas. De acuerdo con algunos trabajos, en los últimos 15 años y en muchas partes del mundo, los brotes de ciertas algas dañinas han incrementado en frecuencia, rango geográfico y virulencia.

Consideremos varios ejemplos. Al exponer vieiras a pequeñas cantidades de toxinas del dinoflagelado *Alexandrium tamarense*, se les desgastaba el manto intestinal y decaía su ritmo cardíaco y respiratorio. Otros dinoflagelados producen toxinas de la ciguatera, que se acumulan en los peces de arrecife sin matarlos del todo. Los peces crecen lo bastante para ser pescados; las personas que los consumen, enferman. De hecho,

enferman más por barracudas, pargos rojos, meros y otros peces tropicales infectados por toxinas de la ciguatera, que por marisco envenenado. Los síntomas pueden volver a manifestarse durante años, a menudo desencadenados por el consumo de bebidas alcohólicas. Las toxinas de la ciguatera impiden el funcionamiento normal de los linfocitos T, atentando de ese modo contra el sistema inmunitario. Todo indica que estas toxinas podrían cobrarse un peaje similar en los peces, dañando el equilibrio y provocando infecciones fúngicas y hemorragias.

La neoplasia diseminada (cáncer similar a la leucemia) y los germinomas (tumores malignos que atacan a los órganos de la reproducción) son dos condiciones que afectan a mejillones azules y almejas de concha blanda. Algunos estudios han asociado esos tipos de cáncer con dinoflagelados que producen saxitoxinas, las mismas toxinas que causan a veces una intoxicación letal en personas que consumen marisco emponzoñado. Los individuos que logran recuperarse de un envenenamiento agudo por saxitoxinas pueden recaer, pasados mucho años, con síntomas muy parecidos a los del paludismo. A lo largo de las costas europeas, la ingestión de marisco contaminado por ácido okadaico proveniente de dinoflagelados tóxicos provoca diarreas; en dosis menores y crónicas indujo tumores en ratas de laboratorio y tejidos humanos. El ácido okadaico puede también destruir células del hipocampo, región cerebral implicada en la memoria, e instar la supresión del sistema inmunitario humano.

Los problemas sanitarios crónicos originados por algas dañinas no se limitan al medio marino. Las mareas de cianofíceas (cianobacterias) pueden consumir durante la noche buena parte del oxígeno del agua; los peces terminan exhaustos y más vulnerables a las enfermedades. En otro orden, las toxinas de esas algas han causado tumores de hígado, pulmón y abdomen en los ratones, e infligido daños, entre leves y graves, en el hígado humano.




5. LOS EQUIPOS HERMETICOS forman ahora parte imprescindible del atuendo de los investigadores en *Pfiesteria* y afines. La agresión podría producirse a través del contacto con el agua contaminada o por inhalación de toxinas.

Signos delatores

Para combatir los efectos nefastos de las algas dañinas hay que empezar por "conocer al enemigo". Pero no abundan los estudios sobre ellas. Cuestiones fundamentales de su ciclo biológico permanecen ignoradas. Pero es imperativo caracterizar químicamente sus toxinas, para así desarrollar sistemas seguros de advertencia sobre el peligro exacto de las aguas.

Obtenida esa información, habrá que abordar la metabolización de las toxinas en el cuerpo humano y su absorción en nuestros tejidos. Deberá darse respuesta a cuestiones importantes: ¿Cuál es el abanico de efectos, agudos y crónicos, que las toxinas ejercen en el sistema nervioso e inmunitario humano? ¿Cuál la persistencia de tales efectos? ¿Qué consecuencias últimas comportan para la salud de los peces? ¿De qué modo se relacionan las toxinas con otros microorganismos y sustancias agresivas en el ataque contra los peces y otras especies, hombre incluido?

Si queda camino por andar en el dominio del ciclo biológico, de muchas especies de algas dañinas no conocemos mejor los factores que estimulan su actividad. El vertido de nutrientes ha avivado la multiplicación de *Pfiesteria* y otros organismos parecidos. Creen algunos que la eutrofización y otros tipos de contaminación han arruinado la estabilidad de muchos ecosistemas acuáticos. Las ingentes mareas de algas tóxicas reflejan ese desequilibrio y son parte activa de su persistencia.

En la quiebra del equilibrio ecológico convergen múltiples causas. La merma incesante de zonas de marisma, genuinos riñones de la biosfera, dificulta la autolimpieza de los cursos fluviales. La coincidencia de mareas algales con episodios de El Niño mueve a sospechar que la tendencia al calentamiento global del clima podría estimular la proliferación de estas especies, amén de extender su zona de influencia. Estos cambios climáticos provocan también inundaciones que acarrean más nutrientes y materia contaminante hacia los ríos y estuarios. La población humana, que ha crecido de una manera espectacular, requiere en su progreso un suministro creciente de agua dulce, recurso de suyo bastante escaso, mientras genera cada vez más residuos que degradan ríos y mares. Al proteger la salud de los peces vulnerables, estamos protegiendo la nuestra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEW "PHANTOM" DINOFLAGELLATE IS THE CAUSATIVE AGENT OF MAJOR ESTUARINE FISH KILLS. J. M. Burkholder, E. J. Noga, C. W. Hobbs y H. B. Glasgow, Jr., en *Nature*, vol. 358, págs. 407-410; 30 de julio, 1992.

NEOPLASIA AND BIOTOXINS IN BIVALVES: IS THERE A CONNECTION? Jan Landsberg en *Journal of Shellfish Research*, vol. 15, n.º 2, págs. 203-230; junio 1996.

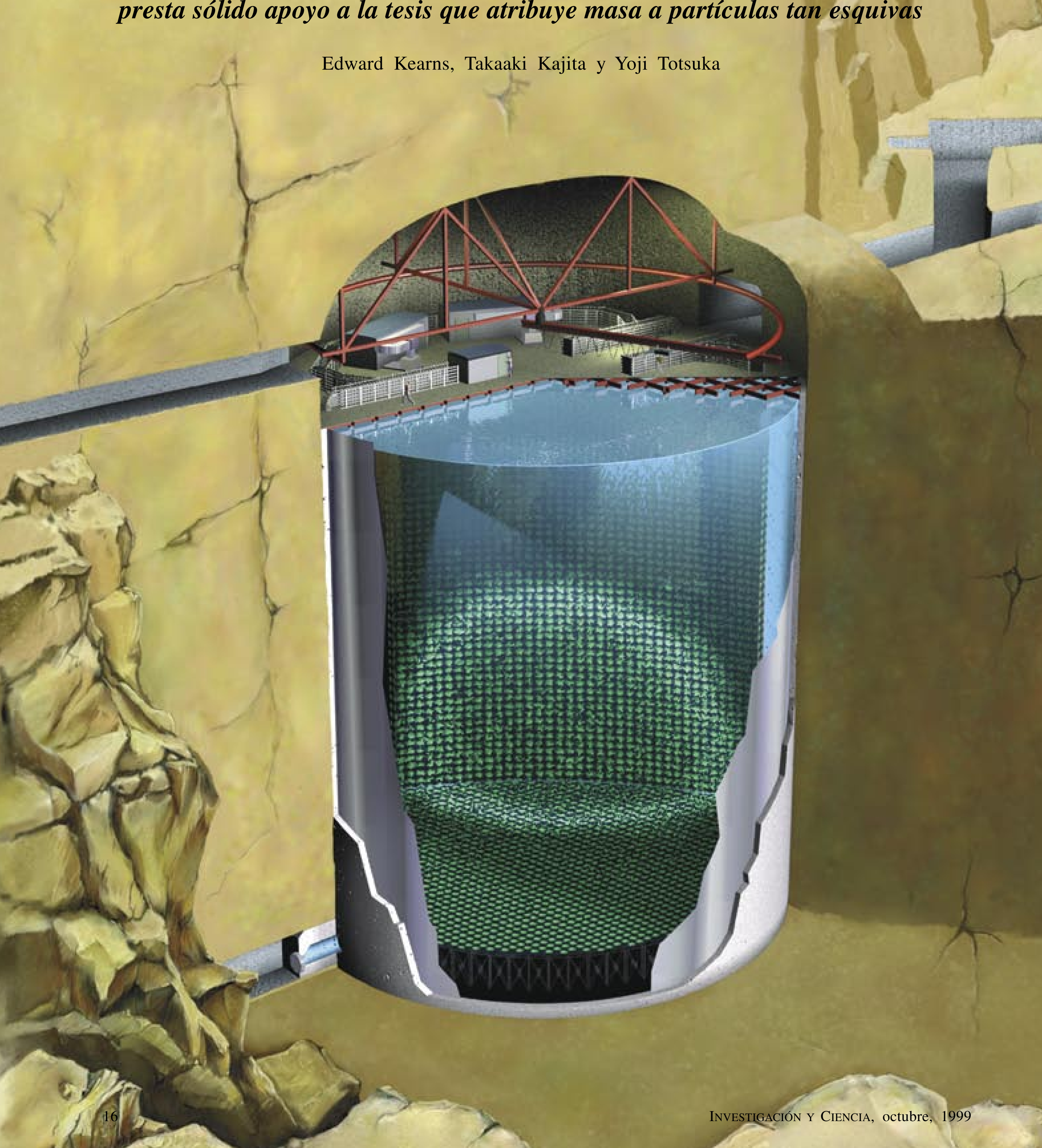
IMPLICATIONS OF HARMFUL MICROALGAE AND HETEROTROPHIC DINOFLAGELLATES IN MANAGEMENT OF SUSTAINABLE MARINE FISHERIES. JoAnn M. Burkholder en *Ecological Applications*, vol. 8, n.º 1 (suplemento), págs. 537-562; febrero 1998.

MARINE ECOSYSTEMS: EMERGING DISEASES AND INDICATORS OF CHANGE. Paul Epstein et al. Year of the Ocean Special Report. Center for Health and the Global Environment, Harvard Medical School, Boston, 1998.

Detección de la masa de los neutrinos

Construido en las entrañas del monte Ikenoyama, un detector gigantesco ha captado las metamorfosis que los neutrinos sufren a lo largo de su trayectoria. Esa observación presta sólido apoyo a la tesis que atribuye masa a partículas tan esquivas

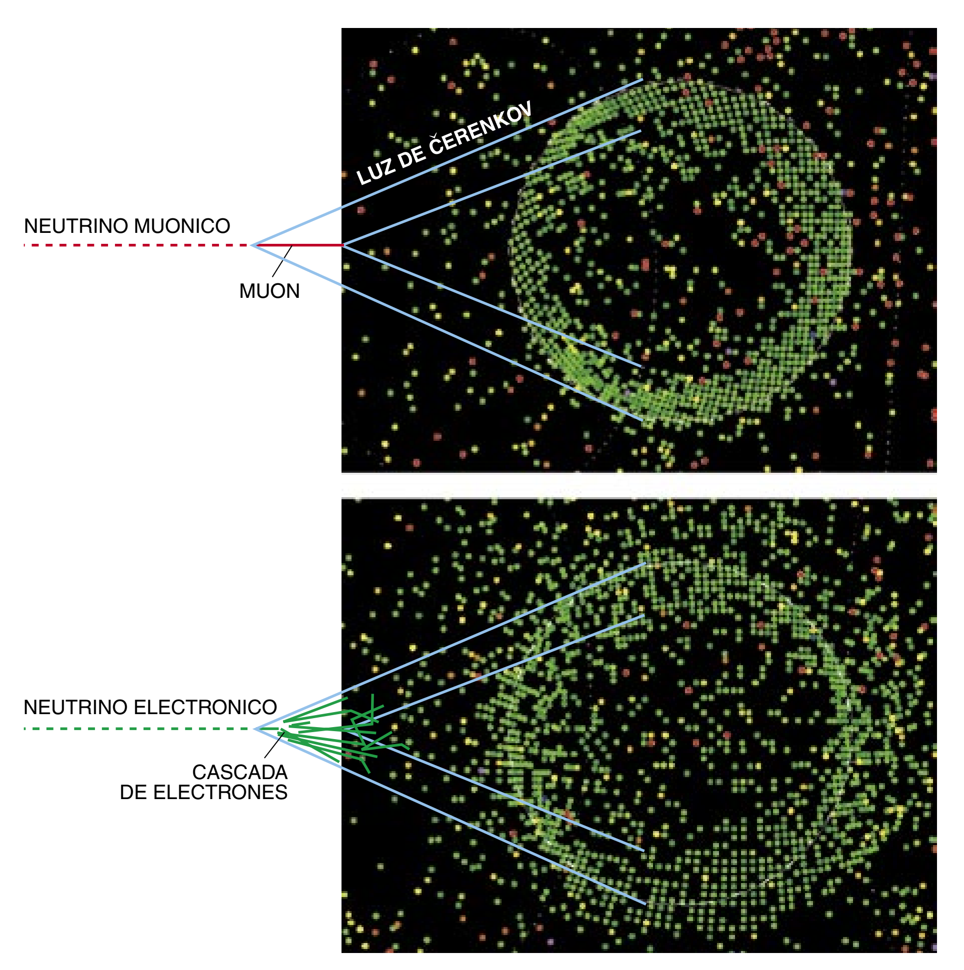
Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoji Totsuka



La basura de uno es el tesoro de otro. Para un físico, el "fondo" es basura, una reacción indeseable, debida seguramente a un fenómeno prosaico y conocido. La "señal" es el tesoro, una reacción de la que esperamos nos descubra nuevos conocimientos acerca del universo. Desde hace veinte años, varios grupos andan tras la desintegración del protón, una señal rarísima (si es que existe) enterrada en un fondo de reacciones instadas por los neutrinos, unas partículas esquivas. El protón, uno de los constituyentes principales de los átomos, parece inmortal. Su desintegración aportaría una prueba convincente sobre la realidad de los procesos enunciados por las teorías de gran unificación. Para muchos, tales teorías trascienden el modelo estándar de la física de partículas, pese a los muchos éxitos que éste ha cosechado. Para escapar de la lluvia incesante de rayos cósmicos, los enormes detectores que habrían de captar las desintegraciones de protones se instalaron en minas o en túneles. Pero, por muy hondo que se excave, esas instalaciones siguen expuestas a la penetración de los neutrinos producidos por los rayos cósmicos.

La primera generación de detectores de desintegraciones de protones funcionó de 1980 a 1995. No encontró señal alguna; pero sirvió para caer en la cuenta de que no era tan fácil entender el fondo de neutrinos, supuestamente trivial. Uno de esos dispositivos experimentales, el Kamiokande, está instalado en Kamioka, localidad minera a unos 250 kilómetros de Tokio (en la trayectoria de vuelo de un neutrino). El nombre es contracción de la versión inglesa de "Experimento de Desintegración de Nucleones de Kamioka". Lo mismo aquí que en el experimento IMB, instalado en una mina de sal cerca de Cleveland (Ohio), se usaron detectores muy sensibles

1. EL DETECTOR SUPERKAMIOKANDE se encuentra en una mina de cinc aún en explotación, en el interior del monte Ikenoyama. Su tanque de acero inoxidable contiene 50.000 toneladas de agua ultrapura, tan transparente que la luz puede atravesar casi 70 metros antes de perder la mitad de su intensidad (en una piscina corriente, sólo unos metros). Observan permanentemente el agua once mil tubos fotomultiplicadores, que cubren las paredes, el suelo y el techo. Son bombillas de vidrio sopladas a mano y forradas por dentro con una fina capa de metal alcalino. Los tubos fotomultiplicadores registran destellos cónicos de luz de Čerenkov, la manifestación de que se ha producido una colisión entre un neutrino de gran energía y un núcleo atómico del agua. Mientras se llena el tanque, unos técnicos limpian, sobre unas balsas hinchables, las bombillas (*recuadro*).



2. SE EMITE UN CONO DE LUZ DE ČERENKOV cuando un neutrino de gran energía choca contra un núcleo atómico y produce una partícula cargada. Un neutrino muónico (*arriba*) crea un muon. Puede que recorra un metro; a continuación proyectará un nítido cono de luz sobre los detectores. Un electrón, producido por un neutrino electrónico (*abajo*), generará una pequeña cascada de electrones y positrones, cada uno de los cuales creará su propio cono de Čerenkov, con lo que el resultado final será un anillo de luz borroso. Los puntos verdes indican luz detectada en un mismo intervalo de tiempo, muy breve.

que observaban un depósito de agua ultrapura a la espera del destello que manifestase que un protón se había desintegrado.

Un suceso así habría pasado inadvertido, como una aguja en un pajar, entre unos mil destellos similares causados por la interacción entre neutrinos y núcleos atómicos del agua. No se vio la desintegración de ningún protón, pero el análisis de esas mil reacciones descubrió un auténtico tesoro: seductores indicios de que los neutrinos eran inesperadamente volubles y pasaban de una especie a otra a lo largo de su recorrido. Si se confirmaba, este fenómeno sería tan apasionante y cambiaría las teorías no menos que lo hiciera la misma desintegración del protón.

Los neutrinos son unas partículas asombrosas, sutiles. Cada segundo atraviesan, por cada centímetro cuadrado de nuestro cuerpo (o de cualquier objeto), 60.000 millones, procedentes del Sol en su mayoría. Al interaccionar apenas con otras partículas, los 60.000 millones suelen pasar por nosotros sin rozar un átomo. Lanzaríamos ese haz a través de un año luz de plomo y lo cruzaría saliendo poco menos que incólume. Un detector de la talla del Kamiokande apresa sólo una fracción muy pequeña de la cantidad anual de neutrinos que pasan por él.

Hay tres variedades o "sabores" de neutrinos. El modelo estándar asocia cada sabor a una partícula con carga eléctrica, el electrón o sus parientes de mayor masa, el muon y la partícula tau. La interacción entre un neutrino electrónico y un núcleo atómico puede crear un electrón; la interacción entre un neutrino muónico y un núcleo atómico, un muon; la de uno táunico, una partícula tau. Desde que se planteó la existencia de los neutrinos, hace unos setenta años, se empezó a negar que tuvieran masa. Pero la teoría cuántica replica que, si pueden cambiar de sabor, lo más probable es que no les falte. De ser ello cierto, su peso conjunto superaría el de todas las estrellas del universo.

Construcción de una trampa de neutrinos mayor

Ocurre a menudo en física de partículas que, para progresar, hay que construir una máquina mayor. El Superkamiokande, o Súper K, mantuvo el diseño básico del Kamiokande, aunque decuplicando sus proporciones. Una batería de detectores sensibles a la luz observa sin cesar el centro de las 50.000 toneladas de agua, a la espera de que alguno de sus protones se desintegre o reciba el impacto de un neutrino. En ambos casos la reacción crea partículas manifestadas por el destello luminoso que producen, la luz de Čerenkov, que viene a ser en óptica lo que en acústica se conoce por estampido de la rotura de la barrera de sonido; la descubrió Pavel A. Čerenkov en 1934. A la manera del avión, que crea una onda de choque sonora cuando vuela más rápido que el sonido, una partícula dotada de carga eléctrica (un electrón o un muon, por ejemplo) emite luz de Čerenkov cuando supera la velocidad de la luz en el medio en que se esté moviendo. No se contradice con ello la relatividad de Einstein, porque en ésta la velocidad crítica es c, la de la luz en el vacío. En el agua la luz se propaga un 25 por ciento más despacio que c, pero otras partículas, si tienen gran energía, pueden moverse por ella a una velocidad casi igual a c. La luz de Čerenkov se emite en un cono cuyo eje es la trayectoria de vuelo de la partícula emisora.

En el Súper K la partícula cargada viaja unos metros y el cono de Čerenkov proyecta un anillo de luz sobre la pared cubierta de detectores de luz. El tamaño, la forma y la intensidad de este anillo manifiestan las propiedades de la partícula cargada, que a su vez nos dicen las del neutrino que la produjo. Podemos distinguir la configuración creada por la luz de Čerenkov de los electrones del patrón dejado por los muones: aquéllos generan una cascada de partículas y el anillo es borroso; el de éstos, en cambio, es un círculo nítido. Con la

luz de Čerenkov se miden también la energía y la dirección del electrón o muon, aproximaciones aceptables de las del propio neutrino.

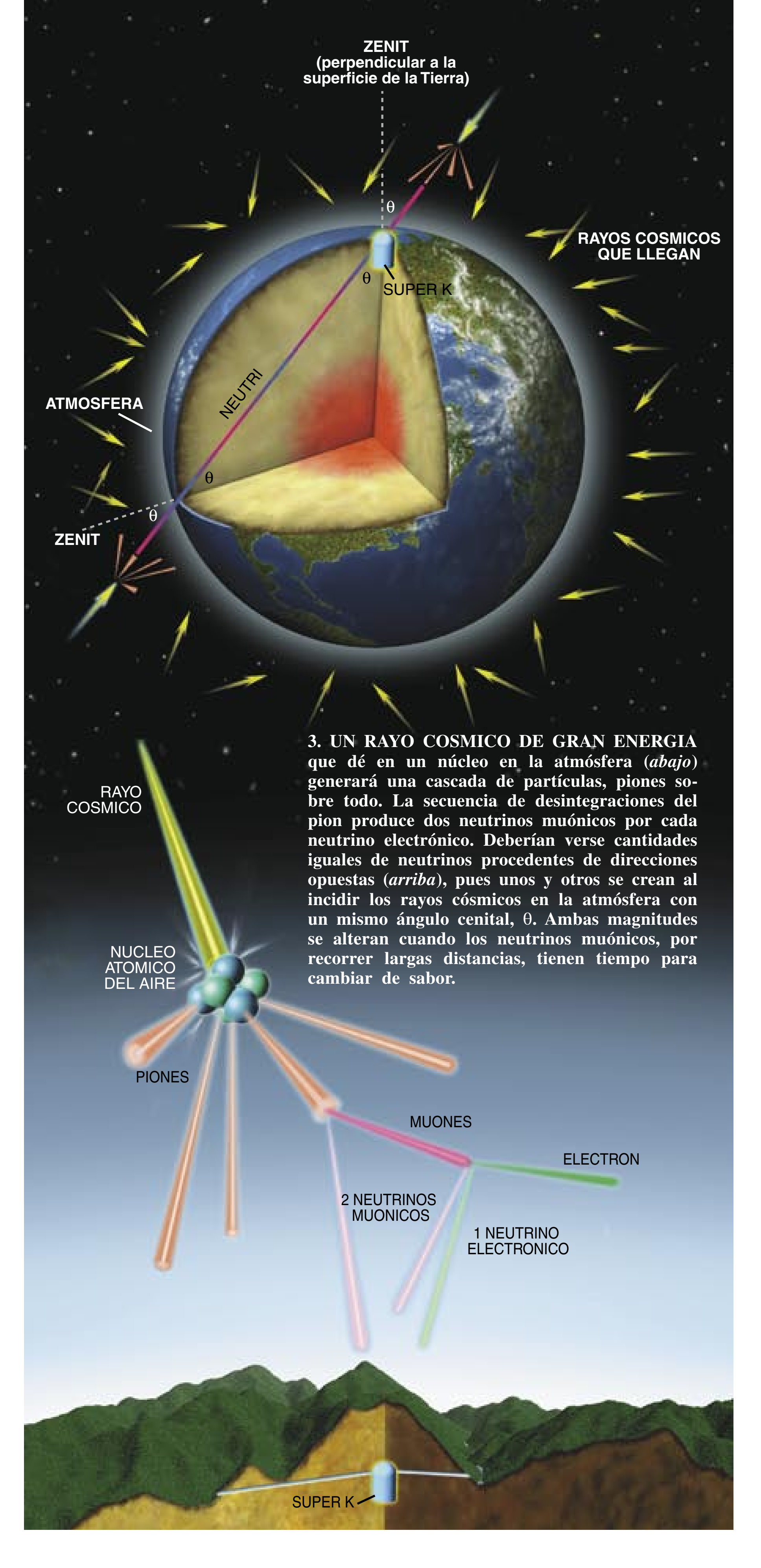
Al Súper K no le es fácil identificar el tercer tipo de neutrino, el neutrino táunico. Este sólo puede interaccionar con un núcleo y crear una partícula tau si tiene energía suficiente. Un muon es unas 200 veces más pesado que un electrón; una partícula tau, unas 3500 veces. La masa del muon cae dentro del intervalo de energías de los neutrinos atmosféricos, pero sólo una fracción pequeña de éstos porta energías del orden de la masa de una partícula tau; la mayoría, pues, de los neutrinos táunicos presentes en la mezcla pasarán por el Súper K sin ser detectados.

Pero, ¿cuántos hay? Hemos construido un detector magnífico para estudiar los neutrinos, y nuestra primera tarea es la de contar cuántos vemos. De la mano de esa pregunta viene otra: ¿cuántos esperábamos? Para responderla hay que analizar cómo se producen.

El Súper K observa los neutrinos atmosféricos, que nacen de la rociada de partículas generada cuando un rayo cósmico entra en la atmósfera superior. Los proyectiles incidentes (los rayos cósmicos primarios) abundan en protones, con algunos núcleos más pesados, de helio o de hierro, por ejemplo. Cada colisión desata una cascada de partículas secundarias, en su mayoría piones y muones, que se desintegran durante su corto vuelo por el aire y crean neutrinos. Sabemos, aproximadamente, cuántos rayos cósmicos dan en la atmósfera por segundo y cuántos piones y muones se producen en cada colisión, así que podemos predecir cuántos neutrones se esperan.

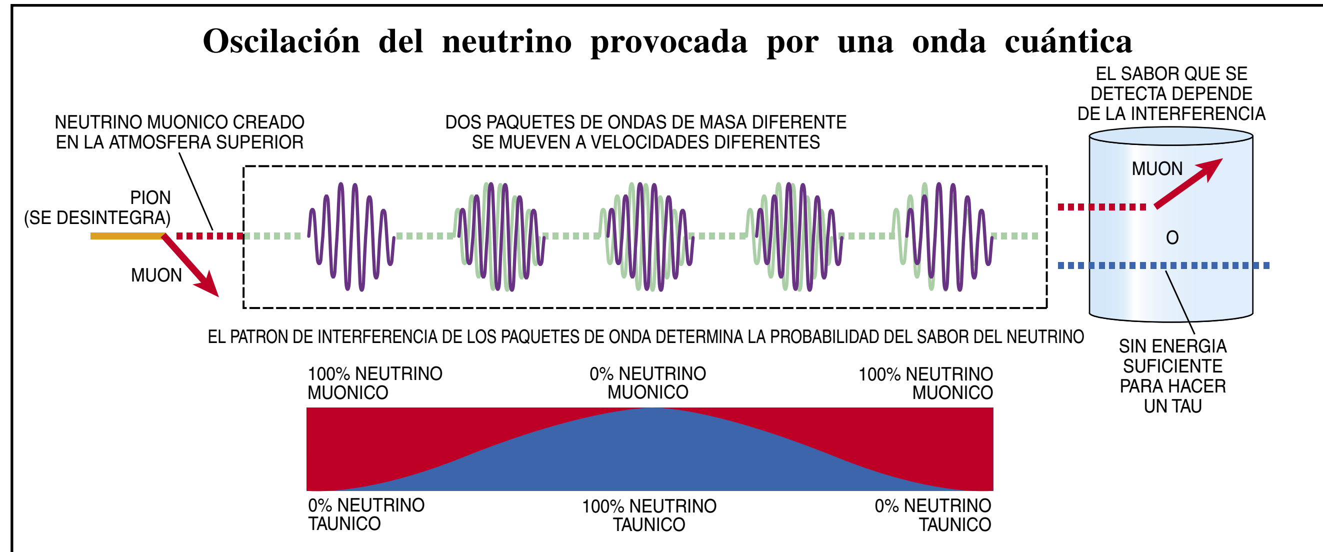
El truco de las proporciones

Por desgracia, el margen de precisión de ese cálculo es de un 25 por ciento. No queda más remedio que echar mano de un truco frecuente: suele ser más fácil determinar la razón entre dos magnitudes que cada una de ellas por separado. En el caso del Súper K la clave es la desintegración secuencial de un pion en un muon y en un neutrino muónico seguida de la desintegración del muon en un electrón, un neutrino electrónico y otro neutrino muónico. No importa cuántos rayos cósmicos caigan en la atmósfera terrestre o cuántos piones se produzcan: por cada neutrino electrónico habrá alrededor



3. UN RAYO COSMICO DE GRAN ENERGIA que dé en un núcleo en la atmósfera (*abajo*) generará una cascada de partículas, piones sobre todo. La secuencia de desintegraciones del pion produce dos neutrinos muónicos por cada neutrino electrónico. Deberían verse cantidades iguales de neutrinos procedentes de direcciones opuestas (*arriba*), pues unos y otros se crean al incidir los rayos cósmicos en la atmósfera con un mismo ángulo cenital, θ. Ambas magnitudes se alteran cuando los neutrinos muónicos, por recorrer largas distancias, tienen tiempo para cambiar de sabor.

Oscilación del neutrino provocada por una onda cuántica



Un pion que se desintegra (*arriba a la izquierda*) produce un neutrino. Según la descripción mecanocuántica, el neutrino aparece como una superposición de dos paquetes de ondas de masa diferente (*violeta y verde; arriba, en medio*), que no se propagan a la misma velocidad: el más ligero adelanta al más pesado, con la consiguiente interferencia de las ondas. El patrón de interferencia controla qué sabor es más probable que se le detecte al neutrino —muónico (*rojo*) o táunico (*azul*)— en cualquier punto de su trayectoria de vuelo (*abajo*). Como todos los efectos cuánticos, es un juego de azar, en el que el sabor muónico tiene casi todas las bazas cerca de donde se originó el neutrino. Pero las probabilidades van y vienen; a una distancia determinada se inclinan por el táunico y, más adelante, vuelven a favorecer al muónico. Cuando el neutrino termina por interaccionar con el detector (*arriba a la derecha*), la suerte cuántica está echada. Si ha salido muónico se producirá un muon; si sale táunico y no tiene energía suficiente para crear una partícula tau, el Súper K no detectará nada.

—E.K., T.K. y Y.T.

de un par de neutrinos muónicos. El cálculo es más complicado y obliga a efectuar simulaciones por ordenador de las cascadas de rayos cósmicos, pero finalmente predice una razón con una precisión del 5 por ciento; proporciona, pues, al cotejo un valor mucho mejor que los números de partículas por separado.

Tras contar neutrinos durante casi dos años, el equipo del Súper K ha hallado que la razón entre neutrinos muónicos y electrónicos se cifra entre 1,3 a 1, no la esperada de 2 a 1. Por mucho que forcemos los supuestos acerca del flujo de neutrinos, de su interacción con los núcleos y de cómo responde el detector a esos sucesos, no hay justificación para razón tan baja, salvo que los neutrinos pasen de un tipo a otro.

Podemos recurrir de nuevo al truco de las proporciones para comprobar tan sorprendente conclusión. La pista que conduce a un segundo cociente nos la señala otra pregunta: ¿cuántos neutrinos han de llegar de cada dirección? Los rayos cósmicos caen sobre la atmósfera terrestre de una forma bastante uniforme en todas las direcciones. Sólo hay dos efectos que malogran la regularidad. El primero tiene que ver con que el campo magnético de la Tierra, que, al desviar algunos rayos cósmicos, sobre todo los de poca energía, sesga el patrón de las direcciones de llegada. En segundo lugar, los rayos cósmicos que lamen tangencialmente la Tierra crean cascadas que no descienden hasta las profundidades de la atmósfera y cuyo desarrollo difiere del seguido por las que se precipitan directamente de arriba abajo.

De la geometría nos llega la salvación. Si "miramos" cielo arriba con cierto ángulo de inclinación con respecto a la vertical y luego abajo, hacia el suelo, con ese mismo ángulo, "veremos" el mismo número de neutrinos procedentes de cada dirección. Ambos conjuntos de neutrinos son producidos por rayos cósmicos que dan en la atmósfera con igual ángulo, si bien en el primer caso las colisiones ocurren sobre nuestras cabezas y en el segundo al otro lado



1930 Wolfgang Pauli salva el principio de conservación de la energía con la hipótesis de que una partícula todavía desconocida se lleva la energía que falta en algunas desintegraciones radiactivas.

1933 Enrico Fermi formula la teoría de la desintegración beta e incorpora la partícula de Pauli, llamada ahora "neutrino", en italiano "el pequeño neutro".



1956 Frederick Reines (centro) y Clyde Cowen fueron los primeros en detectar el neutrino; se valieron del reactor nuclear del río Savannah.

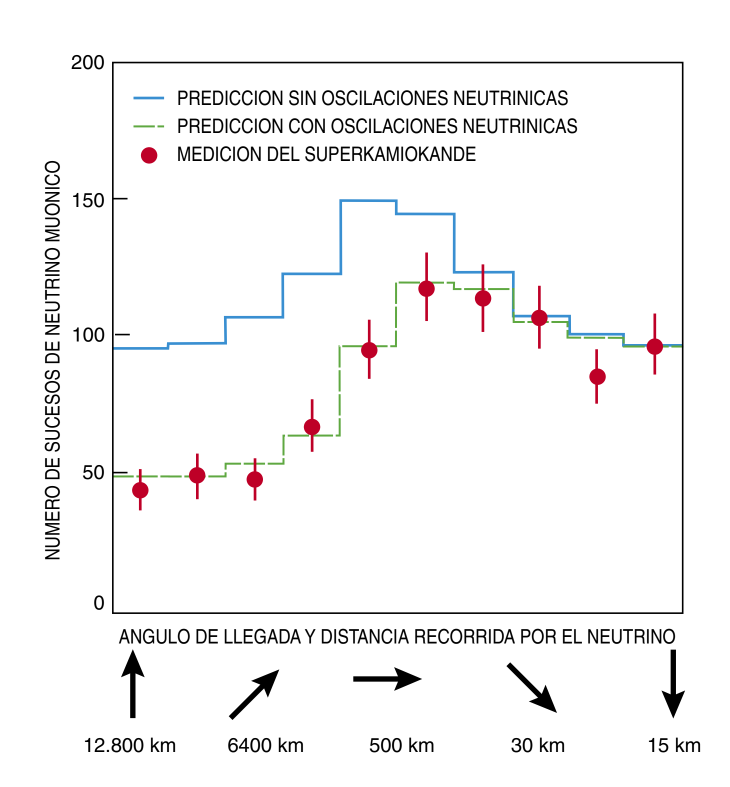
1962 El primer haz de neutrinos creado por un acelerador muestra en Brookhaven que hay neutrinos electrónicos y muónicos.



1969 Raymond Davis, junior, fue el primero en medir los neutrinos procedentes del Sol; utilizó 600 toneladas de líquido de limpieza en una mina de Homestake, Dakota del Sur.

del globo. Para sacar partido de este hecho escogemos sucesos neutrínicos de energía lo bastante alta (así los rayos cósmicos que los han creado no habrán sido desviados por el campo magnético de la Tierra) y dividimos el número de neutrinos que van hacia arriba por el de neutrinos que van hacia abajo. Esta razón ha de ser exactamente uno si los neutrinos no cambian de sabor.

De acuerdo con lo esperado, vimos un número de neutrinos electrónicos de gran energía que iban hacia arriba prácticamente igual al de los que iban hacia abajo, pero el de los neutrinos muónicos que volaban hacia arriba era la mitad del de los que iban hacia abajo. Este hallazgo constituye una segunda prueba de que los neutrinos cambian de identidad. Proporciona, además, una pista de la naturaleza de la metamorfosis. Los neutrinos muónicos en marcha hacia arriba no pueden convertirse en neutrinos electrónicos, pues no hay exceso de neutrinos electrónicos ascendentes. Queda, pues, el neutrino táunico. Los neutrinos muónicos que se convierten en neutrinos táunicos atraviesan el Súper K sin interaccionar, sin ser detectados.



4. EL NUMERO DE NEUTRINOS DE GRAN ENERGIA que llegan con diferentes trayectorias al Súper K guarda cabal acuerdo con la predicción que tiene en cuenta la existencia de oscilaciones neutrínicas (*verde*), pero no con la que supone que no las hay (*azul*). Los neutrinos que van hacia arriba (*representados hacia la izquierda de la gráfica*) han recorrido una distancia suficiente para que la mitad cambie de sabor y escape a la detección.

Sabores volubles

Las dos razones citadas son un buen indicio de que los neutrinos muónicos se transforman en neutrinos táunicos. Mas, ¿por qué han de tener que cambiar de sabor los neutrinos? La física cuántica describe con una onda la partícula que se mueve por el espacio: además de masa y carga, la partícula tiene longitud de onda, puede difractarse, etcétera. Puede incluso ser superposición de dos ondas. Supóngase que éstas corresponden a masas un poco distintas. Cuando viajen juntas, la ligera se adelantará a la pesada, interferirán entre sí y se producirá una fluctuación a lo largo de la trayectoria de la partícula. Hay una analogía musical para esta interferencia: el sonido oscilante que producen dos notas casi iguales.

En música ese efecto provoca la oscilación del volumen; en física cuántica oscila la probabilidad de detectar un tipo u otro de neutrino. Al principio, la probabilidad de que el neutrino sea muónico es del ciento por ciento; tras recorrer una distancia, la de que se presente como táunico será del ciento por ciento también. En otras posiciones podrá ser muónico o táunico, según cómo caiga el dado.

No deja de resultar un tanto extraño el comportamiento oscilante en una partícula. Pero recuérdense las contorsiones parecidas que ejecuta el fotón, la partícula de la luz. Puede tener varias polarizaciones, vertical, horizontal, circular a izquierdas o a derechas. No difieren en la masa, pues carecen de ella, pero en algunos materiales con actividad óptica la luz polarizada circularmente a izquierdas se mueve más deprisa que la polarizada a derechas. Un fotón con una polarización vertical es una superposición de esas dos posibilidades; cuando atraviesa un material ópticamente activo, su polarización gira (es decir, oscila) y pasa de vertical a horizontal y así sucesivamente, conforme los dos componentes circulares se sincronizan y desincronizan.

1975–1977

Se descubren el leptón táunico y el quark b, y con ellos una tercera generación de quarks y leptones.

1983

Se descubren en el CERN los bosones W y Z^0, los transmisores de la fuerza débil, la que interviene en las reacciones neutrínicas.

1987



Astronomía neutrínica: los experimentos sobre la desintegración de los protones IMB y Kamiokande detectan 19 neutrinos de la supernova 1987A, de la Gran Nube de Magallanes.

1989

La tasa de desintegración del Z^0 se mide con precisión en el SLAC y en el CERN y se ve que sólo hay tres generaciones activas de neutrinos.

1998



El Súper K reúne a partir de los neutrinos atmosféricos indicios de la existencia de las oscilaciones neutrínicas.

EDWARD KEARNS, TAKAAKI KAJITA y YOJI TOTSUKA participan en el proyecto internacional del Superkamiokande. Kearns, profesor de física en Boston, y Kajita, en Tokio, dirigen el equipo que analiza los datos relativos a las desintegraciones de protones y neutrinos atmosféricos obtenidos por el Súper K. Totsuka es portavoz del proyecto y director del Instituto de Investigaciones sobre Rayos Cósmicos de la Universidad de Tokio, responsable del experimento.

Para las oscilaciones neutrínicas del tipo que vemos en el Súper K no hace falta un material "ópticamente activo". Basta con una diferencia de masas suficiente entre los dos componentes neutrínicos para que oscile el sabor, pase el neutrino por aire, por roca sólida o por un puro vacío. Cuánto habrá oscilado un neutrino para cuando llegue al Súper K dependerá de su energía y de la distancia que haya cubierto desde su creación. Para los neutrinos que van hacia abajo, que como mucho habrán recorrido unas docenas de kilómetros, no podrá haber tenido lugar más que una pequeña fracción del ciclo de la oscilación y el sabor sólo se habrá modificado un poco; casi con toda seguridad se detectará el muónico original. Los neutrinos que se mueven hacia arriba, producidos a miles de kilómetros de distancia, habrán pasado por tantas oscilaciones que, en promedio, sólo la mitad se detectará como muónica. La otra mitad atravesará el Súper K en la indetectable forma táunica.

Esta descripción es sólo una exposición burda, pero los argumentos basados en la proporción de sabores y la razón entre sucesos ascendentes y descendentes resultan tan convincentes, que se considera la explicación más probable de los datos. Hemos investigado la variación del número de neutrinos muónicos según la energía del neutrino y el ángulo de llegada. Comparamos el número medido y el esperado para una amplia serie de situaciones oscilantes posibles (incluida la inexistencia de oscilaciones). Los números no se parecen a los que se esperarían si no hubiese oscilaciones; concuerdan, en cambio, con las oscilaciones neutrínicas previstas para ciertos valores de la diferencia de masas y de otros parámetros físicos.

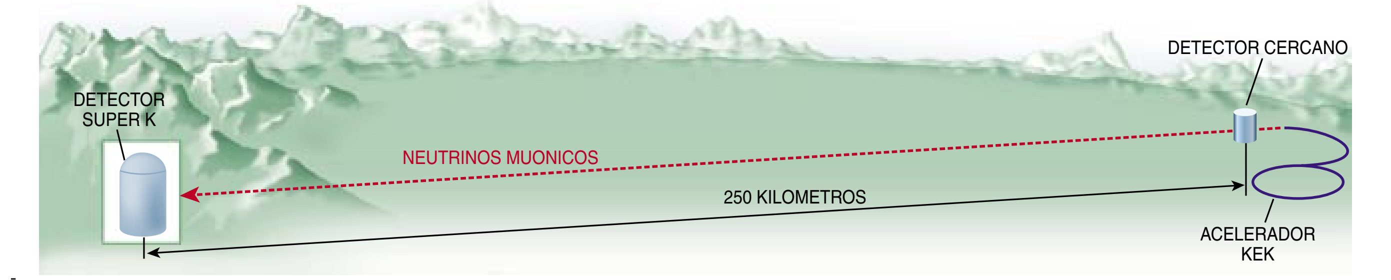
Con unos 5000 sucesos observados en los dos primeros años del experimento, hemos acabado con cualquier cábala de que los números anómalos de los neutrinos atmosféricos fuesen un espejismo estadístico. Pero sigue importando que se confirme el efecto mediante la observación de la misma oscilación de los neutrinos muónicos con otros experimentos o técnicas. Lo han ratificado hasta cierto punto otros detectores de Minnesota e Italia, pero como han medido menos sucesos la certeza estadística es inferior.

Corroboraciones

El estudio de otro tipo de interacción neutrínica aporta una nueva corroboración. Hablamos de las colisiones con los núcleos de la roca que rodea a nuestro detector. Los neutrinos electrónicos producen electrones con las subsiguientes cascadas de partículas, pero son absorbidas por la roca y no llegan nunca a la caverna del Súper K. Los neutrinos muónicos de gran energía crean muones enérgicos que pueden atravesar muchos metros de roca y llegar a nuestro detector. Contamos esos muones, procedentes de los neutrinos que se mueven hacia arriba (los que van hacia abajo quedan ocultos por el fondo de muones de los rayos cósmicos que entran en el monte Ikenoyama desde arriba).

Podemos contar los muones que viajan hacia arriba y llegan al detector con trayectorias muy diversas, desde los que suben verticalmente a los que se desplazan casi horizontalmente. Estos caminos corresponden a distancias recorridas por los neutrinos (desde su producción en la atmósfera hasta la creación de un muon cerca del Súper K) que pueden ser de sólo 500 kilómetros (la distancia al





5. SE PLANEAN EXPERIMENTOS DE BASE LARGA en Japón y en Estados Unidos. Se detectarán haces de neutrinos emitidos por aceleradores de partículas a cientos de kilómetros de distancia. Deberían confirmar la realidad de las oscilaciones y medir con precisión las constantes de la naturaleza que las controlan.

borde de la atmósfera cuando se mira horizontalmente) o de hasta 13.000 kilómetros (el diámetro de la Tierra cuando se mira justo hacia abajo). Observamos que la cuantía de neutrinos muónicos de energía menor que han viajado una larga distancia ha mermado más que el número de los neutrinos de mayor energía que han recorrido una distancia pequeña. Justamente lo que esperábamos en caso de haber oscilaciones. El análisis detallado produce unos parámetros neutrínicos parecidos a los de nuestro primer estudio.

Si tenemos en cuenta sólo los tres tipos conocidos de neutrinos, nuestros datos nos dicen que los neutrinos muónicos se convierten en neutrinos táunicos. Afirma la teoría cuántica que la causa que se esconde tras la oscilación es, casi con toda seguridad, la masa de esos neutrinos, aunque durante 70 años se les haya negado ese atributo.

Por desgracia, la teoría cuántica también obliga a que nuestro experimento se limite a medir sólo la diferencia del cuadrado de las masas de los dos componentes neutrínicos, porque esa magnitud es la que determina la longitud de onda de la oscilación. No es sensible a la masa de las partículas por separado. Los datos del Súper K dan una diferencia de los cuadrados de las masas que cae entre los 0,001 y los 0,01 electronvolts (eV) al cuadrado. Dado el patrón de las masas de otras partículas conocidas, es probable que uno de los neutrinos sea mucho más ligero que el otro, en cuyo caso la masa del neutrino más pesado estaría, pues, entre los 0,03 y los 0,1 eV. ¿Qué consecuencias extraer de este resultado?

En primer lugar, la concesión de masa a los neutrinos no arruina el modelo estándar. Que no coincidan los estados de masa que constituyen cada neutrino requiere la introducción de parámetros de mezcla. Una pequeña cantidad de una tal mezcla se observó entre los quarks, pero de nuestros datos se sigue que los neutrinos necesitan un grado de mezcla mucho mayor, información importante a tomar en obligada consideración por las nuevas teorías.

En segundo lugar, la cifra de 0,05 eV sigue estando muy cerca de cero, si se compara con las masas de las demás partículas de la materia. (La más ligera es el electrón, con una masa de 511.000 eV.) Tenía, pues, su explicación aferrarse a la idea de una masa cero para los neutrinos. Los propios físicos empeñados en construir una teoría de gran unificación que combine todas las fuerzas a energías altísimas —menos la gravedad— toman nota de esa ligereza relativa de los neutrinos. Suelen recurrir a un artificio matemático, el mecanismo de vaivén, que exige en los neutrinos masas muy pequeñas, aunque no nulas. Aquí la palanca que separa los livianos neutrinos de los quarks y leptones, miles de millones a billones de veces más pesados, es la masa de alguna partícula muy pesada, del orden de magnitud quizá de la masa de gran unificación.

En el inventario de masas del universo habrá que registrar la del neutrino. Llevan años los astrónomos intentado determinar cuánta masa suman la materia luminosa de las estrellas y la masa ordinaria, difícil de ver, de las enanas marrones o del gas difuso. La masa total puede medirse también indirectamente a partir del movimiento orbital de las galaxias y de la velocidad a la que se expande el universo. La masa a la que llegan las vías indirectas multiplica por 20 el valor obtenido en la cuenta directa. La masa de los neutrinos que se desprende de nuestros resultados es demasiado pequeña para resolver el misterio por sí sola. No obstante, los neutrinos creados durante la gran explosión llenan el espacio y su masa podría ser del orden de la de todas las estrellas juntas. Puede

Otros problemas, otras posibilidades

Hay otras indicaciones de que los neutrinos tienen masa y los físicos de partículas se aprestan a ponerlas en orden. Durante más de treinta años se han estado captando neutrinos electrónicos generados por los procesos de fusión nuclear del Sol. Estos experimentos han contado siempre menos neutrinos que los predichos por los mejores modelos solares.

El Súper K ha contado también esos neutrinos solares y sólo ha encontrado un 50 por ciento de los esperados. Estamos estudiando estos datos con la esperanza de dar con una huella clara de las oscilaciones neutrínicas. El Observatorio Sudbury de Neutrinos, en Ontario, detectó sus primeros neutrinos en mayo. Contiene mil toneladas de agua pesada, que mejora mucho la detección de los neutrinos solares. Pronto empezarán a funcionar otros detectores.

Un experimento del Laboratorio Nacional de Los Alamos aporta un indicio más de la existencia de las oscilaciones neutrínicas: detecta neutrinos electrónicos procedentes de una fuente que sólo debería producirlos muónicos. Pero la señal está mezclada con procesos de fondo. El resultado no se ha confirmado todavía con otros experimentos, pero en los próximos años se emprenderán algunos para contrastarlo.

Las oscilaciones entre los neutrinos muónicos y táunicos inducidas por la masa parecen la explicación más natural de los datos del Súper K, pero hay otras posibilidades. La primera es que en la situación más general se mezclarían los tres sabores de los neutrinos; los datos del Súper K son compatibles, en las energías que cubre, con algunas oscilaciones entre los neutrinos muónicos y los electrónicos. Pero los resultados de un experimento efectuado en la central de energía nuclear de Chooz, en las Ardenas francesas, limita mucho la magnitud de las oscilaciones entre los sabores electrónico y muónico en el Súper K.

Otra posibilidad es que los neutrinos muónicos se conviertan, al oscilar, en un sabor de neutrino no detectado hasta ahora. Los estudios sobre la partícula Z^0 realizados en el CERN muestran que sólo hay tres sabores activos de neutrinos (“activo” quiere decir que el sabor participa en la interacción nuclear débil). Un nuevo sabor, pues, tendría que ser “estéril”, una variedad de neutrino que interaccionase sólo por medio de la gravedad. Algunos físicos apoyan esta idea porque los elementos de juicio observacionales de que se dispone sobre tres fenómenos distintos (los neutrinos solares, los atmosféricos y los datos de Los Alamos) no pueden ser explicados con un solo conjunto coherente de masas de los neutrinos electrónicos, muónicos y táunicos.

Se han propuesto además otros mecanismos oscilatorios, basados en fenómenos más extraños que la masa de los neutrinos.

—E.K., T.K y *Y.T.*

que influyesen en la formación de las macroestructuras astronómicas, como los cúmulos de galaxias.

De nuestros datos se van a beneficiar dos experimentos inmediatos. Basándose en los primeros indicios producidos por detectores menores, muchos físicos han decidido no tener que depender más de los neutrinos de los rayos cósmicos, gratis pero incontrolables, y ahora los crean con aceleradores de gran energía. Han de recorrer una distancia larga para que se observen las oscilaciones; por eso, se apuntan los haces hacia un detector situado a cientos de kilómetros. Se está construyendo uno en una mina de Soudan, Minnesota, optimizado para estudiar los neutrinos que se le envían desde el acelerador del Fermilab, en Batavia, Illinois, en las afueras de Chicago, a 730 kilómetros.

Todo buen detector de neutrinos atmosféricos es también un buen detector de neutrinos de acelerador. En Japón empleamos el Súper K para observar un haz de neutrinos creado a 250 kilómetros de distancia, en el laboratorio del acelerador KEK. Al contrario que con los neutrinos atmosféricos, en este caso se puede encender y apagar el haz, de energía y dirección bien definidas. Y lo más importante, hemos instalado un detector similar al Súper K cerca de donde nace el haz para caracterizar los neutrinos muónicos antes de que oscilen; nos valemos (otra vez) de la razón entre las cuentas tomadas cerca de la fuente y lejos de ella para anular la incertidumbre y verificar el efecto. Los primeros haces artificiales de neutrinos acaban de entrar en las montañas japonesas, apresados algunos por las 50 toneladas del Súper K. Cuántos exactamente, será el capítulo siguiente de esta historia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ELUSIVE NEUTRINO: A SUBATOMIC DETECTIVE HISTORY. Nickolas Solomey, Scientific American Library, W.H. Freeman and Company, 1997.

La dirección del sitio oficial en la Red del Superkamiokande es www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/

El sitio del Experimento de Base Larga K2K sobre Desintegraciones Neutrínicas se encuentra en neutrino.kek.jp/

Y el del Superkamiokande en la red de la universidad de Boston en hep.bu.edu/~superk/index.html





El desarrollo moral de los niños

No basta con decirles a los niños lo que está bien y lo que está mal. Deben ellos ir ejercitándose en el cumplimiento de sus convicciones. A los padres compete ayudarles en ese empeño





1. ENCENDIENDO EL PITILLO, tranquilizando, ayudando al jardinero, peleándose... Los niños y los jóvenes llevan ya, desde su tierna infancia, una vida moral más rica que la que a menudo les atribuyen los adultos. Los científicos se han de esforzar por decir algo útil sobre la conducta de los niños a partir de simplificaciones, pero sin que éstas sean tantas que hagan que se pierda de vista la complejidad del comportamiento infantil.



William Damon

Con preocupante regularidad nos llegan noticias e informes acerca de niños que cometen todo tipo de tropelías y estragos en sus escuelas y en la calle. Atacan a los profesores y a los compañeros de clase, asesinan a sus padres y persiguen a otras personas ya sea por perversidad, por avaricia o por despecho. Oímos hablar de feroces bandas de muchachos entregados a las drogas y al juego, de adolescentes que violan, del vandalismo juvenil, de oleadas de engaños y chantajes incluso en colegios de alto nivel académico. No hace mucho, una pandilla de chicos de clase media tenía aterrorizado con amenazas y extorsiones a un suburbio residencial de California; los miembros de esa banda se iban marcando jactanciosamente puntos por cada fechoría.

Ante semejante avalancha de atrocidades, muchos olvidan que la mayoría de los chicos, durante buena parte del tiempo, cumplen las reglas de su sociedad, actúan como es debido, tratan amablemente a sus amigos, dicen la verdad y respetan a los mayores. Algunos van más lejos. Una gran proporción de la juventud estadounidense se ocupa en servicios voluntarios a la comunidad; entre el 22 y el 45 %, según el lugar. Y numerosos jóvenes han sido también líderes en causas sociales. Robert Coles, psiquiatra de la Universidad de Harvard, ha escrito acerca de niños como Ruby, una negrita que, por los años sesenta, rompió en su escuela la barrera del color. Paseándose Ruby diariamente por el recinto de aquella escuela que preferiría ser toda para blancos, demostró tener un gran sentido del deber moral. Cuando sus condiscípulos se burlaban de ella y la increpaban, Ruby, en vez de replicarles, rezaba por ellos. “Ruby —observa Coles— tenía voluntad y la empleó para tomar una decisión ética; dio pruebas de poseer mucha energía moral, honradez y valentía.”

Todos los niños nacen capacitados para avanzar por la senda del desarrollo moral. Numerosos recursos innatos les predisponen para actuar de acuerdo con un orden ético. Pensemos en la empatía, o capacidad para experimentar por comunicación afectiva el gozo y el dolor de otras personas. La empatía forma parte de nuestro patrimonio específico. Los neonatos gritan cuando oyen a otros gritar y en un ambiente plácido dan señales de sentirse a gusto emitiendo placenteros arrullos y risas. En el segundo año de su vida no es raro que los pequeños consuelen a sus iguales o a sus padres si los perciben tristes o disgustados.

No importa que ignoren, a veces en absoluto, qué suerte de alivio proporcionar. Martin L. Hoffman, psicólogo de la Universidad de Nueva York, vio que un bebé le ofrecía a su madre el andador al notar que ésta no se encontraba bien. Aunque la disposición emocional a ayudar está presente, los medios de ayudar con eficacia a los demás se han de aprender e ir refinando a través de la experiencia social. Por otra parte, en muchos individuos la capacidad de empatía se estanca o incluso disminuye. Y hay quienes pueden actuar cruelmente respecto a aquellos con los que rehúsan simpatizar. Un oficial de policía neoyorquino le preguntó a un gamberro adolescente cómo, en el asalto a un local, había sido capaz de dar una paliza a una anciana de 83 años. El chico respondió: “¿Por qué iba a andar con cuidado? A mí ¿qué me importaba ella?”

Una explicación científica del desarrollo moral ha de dar razones de lo que está bien y de lo que está mal. ¿Por qué la mayoría de los niños actúan de un modo ético, pese a que semejante conducta va en contra de sus intereses egoístas? ¿Por qué algunos niños se salen de los cauces comúnmente aceptados, haciéndose a menudo con ello gran daño a sí mismos y a los demás? ¿De qué modo va un niño adquiriendo, o dejando de adquirir, un talante ético y un compromiso perdurable con un comportamiento moral?

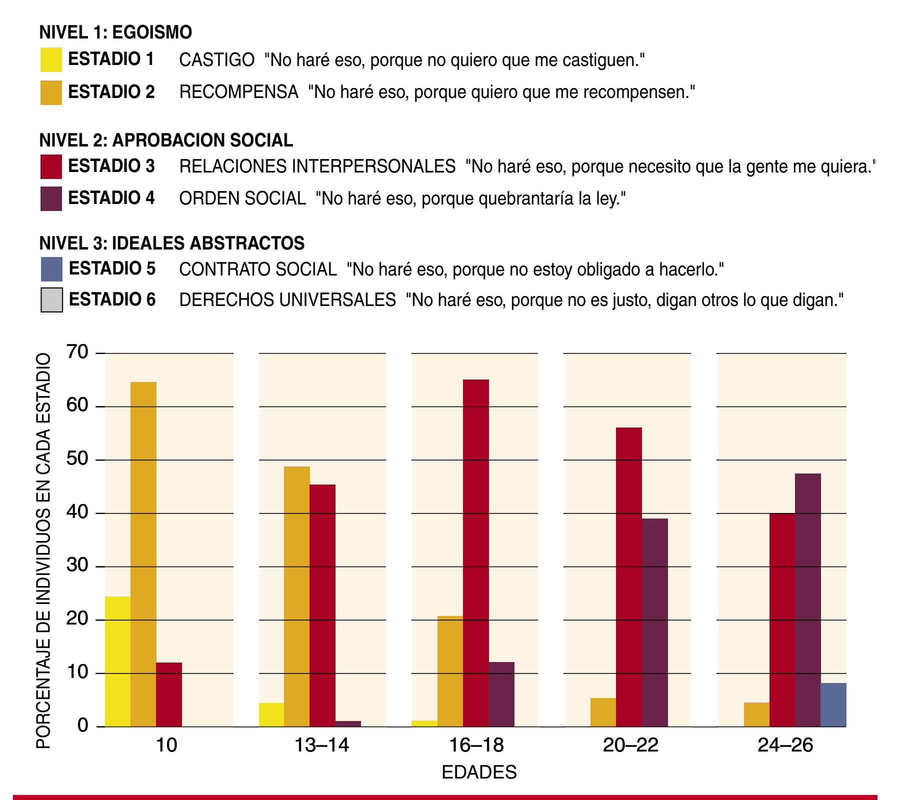
Los psicólogos no tienen respuestas definitivas para estas cuestiones. Muchos estudios se limitan a confirmar las intuiciones y observaciones de los padres. Pero a éstos, como a todo el mundo, pueden despistarles sus propios prejuicios, una información incompleta y el sensacionalismo de los medios de comunicación. A un acontecimiento trivial —la asistencia a un concierto de música— pueden atribuirle un problema de hondas raíces, la drogadicción por ejemplo. O culpar de sus propios problemas a la rígida educación recibida, con lo que traten de compensarlo criando a sus hijos de una forma harto permisiva. En el campo polémico de los valores morales, para evitar bruscos vaivenes de reacciones emocionales y ahorrarse caer en los mismos errores, conviene abordar las cuestiones con un método sistemático y con la mayor objetividad científica.

La genealogía de la moral

El desarrollo de la moralidad ha alimentado un filón bibliográfico en el ámbito de las ciencias sociales. Las revistas abundan en nuevas observaciones y en modelos alternativos. Unas teorías destacan los fundamentos biológicos; otras insisten en la experiencia y en el influjo social; unas terceras atienden al juicio resultante del desarrollo intelectual del niño. Aunque cada teoría pone énfasis en un factor preferente, todas reconocen que

Los seis estadios del juicio moral

Según van creciendo, los niños, adolescentes y jóvenes dependen menos cada vez de la disciplina externa y más de sus propias convicciones. En ese proceso pasan por, al menos, seis estadios (agrupables en tres niveles) de razonamiento moral (*abajo*), según lo argumentó Lawrence Kohlberg en las postrimerías de los años cincuenta. Los datos probatorios se incluyen en un largo estudio sobre 58 jóvenes que fueron periódicamente entrevistados durante dos décadas. Su madurez moral se juzgó por cómo analizaban dilemas hipotéticos, por ejemplo, el de si un marido debería o no robar una medicina para su moribunda esposa. Valían como respuesta el sí y el no; lo importante era el modo de justificar la que se diera. Los jóvenes, al crecer, fueron pasando por los sucesivos estadios, aunque en porcentajes distintos (*barras del gráfico*). Por el difícil estadio sexto pasaron pocos. Aunque este modelo descriptivo del desarrollo intelectual ha tenido bastante éxito, no explica el comportamiento real de la gente, pues dos personas pueden actuar de forma dispar aun hallándose las dos en el mismo estadio. —*W.D.*



la moralidad o inmoralidad de la conducta no depende de una sola causa. El entretenerse con vídeos violentos o con juegos bélicos puede excitar muchísimo a unos y dejar tranquilos a otros. La opinión común sólo entiende de medidas tajantes; la comprensión científica debe, por contra, basarse en el estudio de la complejidad y diversidad de las vidas de los niños.

Las teorías de orientación biológica o "nativistas" sostienen que el talante moral del sujeto brota de disposiciones emocionales entrañadas en la especie. Hoffman, Colwyn Trevarthen, de la Universidad de Edimburgo, y Nancy Eisenberg, de la estatal de Arizona, han comprobado que los bebés pueden sentir empatía en cuanto empiezan a reconocer la existencia de los otros, desde la primera semana posnatal en algunos casos. Entre las emociones morales de muy pronta aparición se incluyen los sentimientos de vergüenza, culpabilidad e indignación. Según lo ha descrito Jerome S. Kagan, psicólogo infantil de Harvard, los niños comienzan presto a sentirse ofendidos cuando se violan sus expectativas sociales, ya suponga quebrantar las reglas de un juego favorito o redistribuir los botones de la camisa.

Casi todos los individuos, en todas las culturas, heredan tales disposiciones. Mary D. Ainsworth, de la Universidad de Virginia, informó sobre la empatía entre bebés de Uganda y de América del Norte; Norma Feshbach, de la Universidad de California en Los Angeles, hizo un estudio comparado semejante entre recién nacidos de Europa, Israel y los EE.UU.; Millard C. Madsen, de la UCLA, estudió la participación de los niños preescolares en nueve culturas. Por cuanto los psicólogos saben, los niños de todo el mundo se abren a la vida con sentimientos cariñosos para quienes están a su alrededor y con reacciones adversas contra el comportamiento injusto. Las diferencias en cuanto al modo de expresar estas reacciones sólo emergen más tarde, una vez introducidos los niños en el sistema de valores de su propia cultura.

Las teorías que insisten en el aprendizaje se fijan en la adquisición infantil de normas de conducta y valores mediante la observación, la imitación y la recompensa. Las investigaciones así orientadas llegan a la conclusión de que la conducta moral depende del contexto, varía según las situaciones y no guarda vinculación con las creencias establecidas. Entre las investigaciones históricas de los años veinte, todavía invocadas, recuérdese el estudio de Hugh Hartshorne y Mark May sobre la reacción de los niños ante la oportunidad de hacer trampas. La forma de comportarse dependía mucho de si creían que iban a ser descubiertos. No era predecible a partir de su conducta en situaciones previas, ni tampoco de su conocimiento de reglas morales comunes, por ejemplo, los Diez Mandamientos o el código del escultista.

Ulteriores revisiones y análisis de los datos de Hartshorne y May llevados a cabo por Roger Burton, de la Universidad de Nueva York en Búfalo, pusieron de manifiesto una tendencia general: los niños engañaban más que los adolescentes. Quizá la socialización o el desarrollo mental puedan frenar la conducta impropia. Pero el efecto diferenciador no era muy grande.

La tercera de las teorías principales sobre la constitución del talante moral trae a primer plano el desarrollo de la inteligencia. Aduce que la virtud y el vicio dependen, en última instancia, de la elección consciente. Las teorías cognitivas más conocidas son las de Jean Piaget y Lawrence Kohlberg.

WILLIAM DAMON se acuerda de cuando, en la escuela, era un chico violento e insociable. Habiendo descrito en el periódico escolar sus actividades, su profesor de inglés le dijo: "Te pongo un diez por la redacción, pero tu conducta es realmente vergonzosa." Aquel reproche le sirvió de mucho, le hizo reflexionar y cambiar de proceder. Damon dirige un centro de psicología de la adolescencia en la Universidad de Stanford.

En opinión de ambos psicólogos, las creencias morales tempranas de los niños se orientan hacia el poder y la autoridad. Para los párvulos, el poder es literalmente lo justo. Con el tiempo, llegan a entender que las reglas sociales están hechas por las personas y pueden, pues, renegociarse; la reciprocidad en las relaciones es, comienzan a ver, más ventajosa que la unilateral obediencia. Kohlberg distinguió una secuencia de seis estadios en el proceso de maduración del juicio moral. Se ha utilizado en miles de estudios para medir los progresos de una persona en el razonamiento moral.

Entre la justicia y el chocolate

Aunque las partes principales de la secuencia de Kohlberg han sido confirmadas, no deja de haber notables excepciones. Poca gente, si alguna, llega al sexto estadio, el más avanzado y donde la opinión moral se basa en principios abstractos. En cuanto a los primeros estadios de la secuencia, muchos estudios (entre ellos algunos de mi propio laboratorio) han descubierto que los niños tienen un sentido moral positivo mucho más rico que lo que indica ese modelo. En otras palabras, no actúan sólo por miedo al castigo. Cuando un compañero acapara para sí las pastas de una bandeja o no quiere bajarse del columpio, es común la protesta: "¡Eso no vale!" Al mismo tiempo, los pequeños van cayendo en la cuenta de que tienen la obligación de compartir las cosas con los demás, aunque sus padres no se lo digan. Los niños en edad preescolar creen que los bienes hay que distribuirlos a partes iguales; justifican sus ideas en razones de empatía ("Quiero que mi amigo se sienta a gusto"), reciprocidad ("Ella comparte sus juguetes conmigo") e igualitarismo ("Tenemos que tener todos las mismas cosas"). Todo esto lo entienden mediante la confrontación con sus iguales al jugar. Aprenden muy pronto que, sin justicia, habrá problemas.

En realidad, ninguna de las tres teorías tradicionales explica, por sí sola, el talante moral de los niños y su desarrollo. Ninguna aprehende los factores nucleares de la conducta ética: el carácter y el compromiso. Aparte de cómo desarrollen los niños su inicial sistema de valores, la cuestión clave es: ¿Qué les hace vivir de acuerdo o no con sus ideales? Esa es la vía a explorar por la ciencia.

Los niños, como los adultos, luchan contra las tentaciones. Para ver qué papel cumple ese simulacro de guerra en el mundo de los párvulos, estando yo en la Universidad Clark preparé con mis colaboradores el siguiente experimento. Traíamos niños al laboratorio, los dividíamos en grupos de cuatro y les dábamos cintas y cuentas para que hiciesen pulseras y collares. Les encomiá-

"¿Podrías vivir contento si sólo pensaras en ti?"

En una mísera barriada de Camden, New Jersey, Daniel Hart, psicosociólogo de la Universidad de Rutgers, entrevistó a un muchacho de color que trabajaba en los servicios sociales:

¿Cómo te describirías a ti mismo?

Yo soy el tipo de persona que necesita comprometerse, que cree en el compromiso. Precisamente me agarró este complejo, así lo llamo, donde la gente piensa que Camden es un mal lugar, lo cual me preocupaba. Todas las ciudades tienen sus propios sitios malos, no tengo que decírselo. Lo único que yo quería era trabajar con la gente, trabajar para cambiar la imagen que la gente tiene de Camden. No puedes empezar con los adultos, porque éstos no cambian. Pero, en las mentes de los niños y de los jóvenes sí que puedes introducirte para hacerles entender lo que está mal y decirles que no quieres que ellos sigan por ese camino; entonces la cosa podrá funcionar, porque a ellos es fácil convencerles.

¿Hay solución para problemas morales como éste?

Fundamentalmente, es lo que acabo de decir. Es como si trataras de salvar una vida.

¿Cómo lo sabes?

Porque es eso. ¿Cómo podrías vivir para ti solo? Si me fuese posible, digamos, ayudar a salvar la vida de esa persona... ¿me daría lo mismo dejarla morir? Creo que, si así procediese, nunca más podría vivir con la conciencia tranquila. Hace pocos años asesinaron a mi hermana, y... la noche que la mataron la pasé yo en la casa de enfrente de la suya, hasta el amanecer. Quizá, si hubiese estado yo aquella noche en su casa, no habría sucedido tal desastre.

Has dicho que tu influencia en los demás no es mala. ¿Por qué es esto importante?

Bueno, lo que procuro ante todo es no ser un modelo de mala conducta. Todos tenemos defectos, claro está; pero has de esforzarte por actuar ejemplarmente, incluso si fueras un perro callejero. La sociedad está llena de criminales y estafadores. También de drogadictos. Los niños los ven. Y si un camello les muestra muchos billetes, también ellos quieren tener dinero, y entonces corren mucho peligro de dedicarse a las drogas. Así que es importante que procures no ejercer una mala influencia, porque ésta puede tener consecuencias graves. Por ejemplo, tal vez te divierta el haber dicho a tus hermanitos que se estén callados y no despierten a los papás y así ese día no tendrán que ir a la escuela; pero con ello se acostumbrarán a estar callados [*risas*], a no ir a la escuela, y a otras cosas por el estilo. De modo que una mala influencia tuya ocasiona siempre muchos males.

¿Por qué no quieres que ocurra eso?

Pues porque ya hay en la sociedad actual demasiados crímenes, demasiada violencia. ¡Por todas partes! Hasta yo mismo la he experimentado, pues me han asesinado a una hermana. Mire, tenemos que evitar que en el futuro siga pasando lo mismo, así que hemos de educar a nuestros niños de otra manera.

bamos y agradecíamos su trabajo, que premiábamos con 10 pirulís por grupo. El experimento comenzaba entonces: les dijimos que cada grupo tenía que decidir cómo repartirse del mejor modo la recompensa. Nosotros salíamos de la habitación y les observábamos a través de un espejo unidireccional.

Antes del experimento, entrevistando a los que iban a participar en él, les preguntamos qué entendían por justicia. Queríamos averiguar, por de pronto, si las expectativas de saborear el chocolate prevalecerían sobre su idea abstracta de lo justo y lo injusto. Para comprobarlo a fondo, le dimos a un grupo control un simulacro casi idéntico, consistente en unos rectángulos de cartón que imitaban muy bien el chocolate real,

¿Hay valores universales?

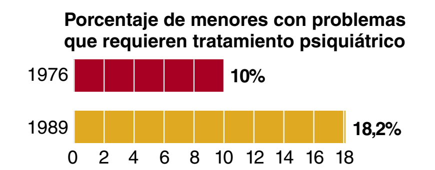
La importancia que, como se ha observado, tienen en el desarrollo moral de los niños los valores compartidos por éstos suscita una de las cuestiones más acaloradamente debatidas hoy en la filosofía y en las ciencias sociales. A saber: ¿varían los valores según se esté en un lugar o en otro, o hay un conjunto de valores universales que guían el desarrollo moral en todo el mundo? ¿Adquieren maneras de conducirse diferentes los niños que se crían en culturas distintas o en distintos tiempos?

Contribuyeron a aclarar algo la cuestión cultural Richard A. Shweder, de la Universidad de Chicago, y sus colegas con un estudio en el que compararon a unos niños hindobrahmines de la India con otros niños educados en ambientes judeo-cristianos de los EE.UU. El estudio reveló sorprendentes contrastes entre los dos grupos. Desde muy pequeños, los niños hindúes aprendían a guardar las tradiciones, a respetar en sus relaciones personales las reglas establecidas y a ayudar a los necesitados. En cambio, a los niños estadounidenses se les orientaba hacia la autonomía, la libertad y los derechos de la persona. Los niños hindúes decían que infracciones de la tradición tales como comer carne de vacuno o dirigirse al propio padre llamándole por su apellido eran especialmente reprensibles. No veían nada malo en que un hombre castigase con la vara los errores de su hijo o el marido golpeara a su mujer si ésta había ido sin su permiso al cine. A los niños estadounidenses les repugnaban todos los castigos físicos, pero faltas tales como comer alimentos prohibidos o dirigirse a alguien de una manera impropia les dejaban indiferentes.

Además, en su proceso de maduración, hindúes y estadounidenses seguían direcciones opuestas. En la India, los niños sólo hicieron juicios de valor respecto a situaciones que les eran muy familiares, mientras que los adultos generalizaban sus valoraciones aplicándolas a un amplio registro de condiciones sociales. En EE.UU., los niños decían que los patrones morales debían aplicarse siempre a todo el mundo, mientras que los adultos modificaban los valores al ir cambiando las circunstancias. Resumiendo: los indios empezaban la vida como relativistas y la terminaban como universalistas, mientras que los estadounidenses recorrían el camino inverso.

Así y todo, sería muy exagerado decir que los niños de distintas culturas adoptan códigos morales totalmente diferentes. En el estudio de Shweder, los niños de ambos grupos pensaban que las acciones fraudulentas (un padre quebrantando la promesa hecha a su hijo) y las contrarias a la caridad (desoír al que pide ayuda para su hijo enfermo) eran malas acciones. Compartían también una repugnancia al robo, al vandalismo y a que se maltrate o dañe a víctimas inocentes, aunque hubo algún desacuerdo sobre en qué consistiera la inocencia. Entre estos juicios axiológicos puede hallarse un sentido moral universal basado en las aversiones comunes en todos los humanos. Sentido que refleja también un elenco de valores esenciales —benevolencia, justicia, honradez— que probablemente son necesarios para el sostenimiento de las relaciones humanas en todas las sociedades excepto en las más desestructuradas.

Una línea paralela de la investigación ha estudiado las diferencias atribuibles al género, llegando a la conclusión de que las niñas aprenden a ser más cuidadosas, en tanto que los niños propenden a las reglamentaciones y a la justicia. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con las predicciones hechas por los teóricos culturalistas, éstas de los que se centran en el género no han sido confirmadas. Al estudio original, que pretendía hallar diferencias entre los géneros, le faltaron grupos control genuinos. Bien diseñados estudios sobre niños estadounidenses —por ejemplo, los de Lawrence Walker, de la Universidad de Columbia Británica— raras veces detectan diferencias entre los ideales de los chicos y los de las chicas. Aun entre los adultos, cuando se controlan como es debido los niveles educacionales y ocupacionales, desaparecen las diferencias. Las orientaciones morales de las abogadas vienen a coincidir con las de sus colegas masculinos, e igual puede decirse de las enfermeras y los enfermeros, de las caseras y los caseros, del personal científico, del universitario, etc. Hay mayor similitud entre las orientaciones morales masculinas y las femeninas dentro de una misma cultura que entre las orientaciones masculinas y las femeninas de culturas distintas.



HOY DIA es mayor el número de menores que necesitan ser atendidos psiquiátricamente, a juzgar por lo que informan muchos padres sobre los problemas emocionales y de conducta de sus hijos.

También son de interés las diferencias generacionales, sobre todo para quienes deploran que la moralidad ande de capa caída. Tales quejas no son, por supuesto, nada nuevas. Hay, con todo, algunas pruebas de que los jóvenes de hoy propenden más que los de la anterior generación a dedicarse a actividades antisociales. Según una encuesta realizada por Thomas M. Achenbach y Catherine T. Howell, de la Universidad de Vermont, padres y maestros informaron de que en 1989 había más comportamientos problemáticos (mentiras, engaños) y otras amenazas al sano desarrollo de los niños (depresiones, retraimientos, abandonos) que en 1976. (Estos investigadores están poniendo ahora al día su encuesta.) Claro que, en el largo curso de la historia humana, 13 años son sólo un parpadeo. Tal vez esos cambios reflejen, más que una tendencia permanente, un problema pasajero, como pueden serlo las modas demasiado permisivas en todo lo que respecta a la crianza de los hijos. *—W.D.*

manera ésta no tan sutil de desviar el egoísmo de los pequeños. Observamos a grupos de niños de 4, 6, 8 y 10 años, para ver si la relación entre el comportamiento concreto y el sentido moral abstracto que les suponíamos cambiaba con la edad.

Los ideales de los niños divergían, aunque siempre dentro de los estrechos límites marcados por el egoísmo. La generosidad que demostraron aquellos pequeños a los que les habíamos dado los rectángulos de cartón triplicó casi la generosidad de los que habían recibido chocolate. Pero la idea moral gozaba todavía de cierto vigor. Por ejemplo, los niños que habían expresado antes la opinión de que las soluciones debían basarse en los méritos ("El que haya hecho mejor la tarea deberá obtener más parte del premio") fueron en la situación real los más inclinados a abogar a favor del mérito. Pero lo hacían tanto más vehementemente cuanto creían poder asegurar que ellos mismos habían realizado la tarea mejor que sus compañeros. Sin tal pretensión, no habría costado mucho persuadirles para que, en vez de la meritocracia, prefirieran el reparto igualitario.

Aun así, éstos no renunciaban del todo a la justicia. Pasaban quizá de una idea de justicia a otra, de la del mérito a la de igualdad, pero nunca recurrieron a justificaciones egoístas del tipo de "A mí tienen que darme más porque soy mayor" o "A los niños nos gustan los caramelos más que a las niñas, y yo soy un niño". Semejantes razonamientos provenían en general de niños que habían declarado no creer en la igualdad ni en la meritocracia. Los mayorcitos tendían a creer más en la justicia y a actuar en consecuencia, aun cuando su acción favoreciese a los otros. Tal resultado corrobora la reconfortante tesis de que los ideales pueden influir cada vez más en la conducta del niño a medida que éste va madurando.

Hacer lo debido

El proceso no es automático. Cada persona ha de asumir un sistema de valores como parte central de su propia identidad. Cuando de la afirmación "La gente debería ser honrada" se pasa al propósito explícito "Yo quiero ser honrado", entonces es más probable que esa persona se atenga siempre a la verdad en la vida diaria. Al uso que de los principios morales hace una persona para definir su propia individualidad se le llama identidad moral. Esta determina no sólo lo que la persona considera que es el modo correcto de actuar, sino también el que se decida a ponerlo en práctica. Para entender la variedad de las conductas morales es importantísima esta distinción, pues hasta los miembros más jóvenes de la sociedad comparten los mismos ideales básicos, mientras que la diferencia de conductas depende de que cada individuo se decida o no a actuar conforme a esos ideales.

Niños y adultos rechazan, de manera casi unánime, el dolor ajeno. Pero ya no son tantos los que sacan la conclusión de que ellos deben hacer algo contra la 'limpieza étnica' de Kosovo, por poner un ejemplo. Serán los que darán dinero o acudan a los Balcanes a ayudar. Su rebelarse contra el sufrimiento humano surge del centro de sus conciencias, de lo que piensan de sí mismos y de las metas de su vida, por lo cual se sienten responsables y obligados a actuar les cueste lo que les cueste.

En un estudio de personalidades con gran altura moral —gentes con un largo historial de preocupación por los demás o de defensa de los derechos humanos— Anne Colby, psicóloga de la Fundación Carnegie, y yo comprobamos que se da un alto nivel de integración entre la identidad personal y los intereses morales. "Quienes se definen a sí mismos a través de sus esquemas morales propenden a ver los sucesos rutinarios de la vida desde una óptica moral; tienden a considerarse necesariamente involucrados en esos problemas", escribimos en dicho estudio. Sin embargo, las figuras analizadas no evidenciaron que sus razonamientos morales fuesen más penetrantes. Sus ideales y sus niveles Kohlberg eran, en buena medida, los mismos que los de cualquier otra persona.

Otras muchas personas, aunque igualmente conscientes de los problemas morales, los consideran alejados de sus vidas e intereses propios. Kosovo y Ruanda suenan a puntos remotos e insignificantes, que se desvanecen muy pronto de la mente. Problemas incluso que afectan a nuestro entorno inmediato —una pandilla de indeseables que amenace a uno de sus compañeros de clase— pueden parecernos ajenos. A quienes piensan así, el no actuar no les menoscaba en nada la idea que tienen de sí mismos. Por ello, pese a la muy extendida idea en contra, su conocimiento moral no bastará para inducirles a actuar también moralmente.

El desarrollo de una identidad moral sigue ciertas pautas generales. Empieza a concretarse al final de la infancia, cuando se ha adquirido la capacidad para analizar a los otros —y también a sí mismos— a través de rasgos de carácter estables. En la infancia, los rasgos de autoidentificación del sujeto suelen consistir en habilidades e intereses relacionados con la acción ("Soy listo" o "Me gusta la música"). A medida que va creciendo, el niño emplea términos morales para autodefinirse. Al co-



2. **AMAGO DE REYERTA en un campo de deportes de Texas. La mayoría de los chicos aprenden pronto que el ser justos evita a menudo (aunque no siempre) las peleas, una lección que les ayuda a ir madurando moralmente.**

mienzo de la pubertad, recurre ya a los adjetivos "imparcial", "generoso" y "honrado".

Algunos adolescentes prefieren incluso describirse por sus metas éticas. Hablan de nobles propósitos, por ejemplo, cuidar a otras personas o hacer progresar a sus comunidades, como de misiones que dan sentido a su vida. Trabajando en Camden, New Jersey, Daniel Hart y sus colaboradores de la Universidad de Rutgers comprobaron que una elevada proporción de los llamados cuidadores ejemplares —dieciochoañeros a los que sus profesores y condiscípulos consideraban muy comprometidos en las tareas del voluntariado asistencial— fundaban su identidad personal en sistemas morales. Sin embargo, respecto a la enjuiciación moral, no obtuvieron más puntos que sus condiscípulos en los tests psicológicos corrientes. Este estudio es digno de notar por haber sido hecho en un ambiente urbano deprimido y entre una población adolescente de alto riesgo y alto índice de criminalidad.

Al otro extremo del espectro moral hay más datos que indican que la identidad moral es la conductora del comportamiento. Hazel Markus, de la Universidad de Stanford, y Daphne Oyserman, de la de Michigan, han observado que los delincuentes jóvenes tienen inmaduras ideas de sí mismos, especialmente al hablar de su personalidad futura (parte crítica de la identidad adolescente). Estos angustiados dieciochoañeros no se imaginan a sí mismos como médicos, maridos, ciudadanos que votan o feligreses de una parroquia; es decir, no se ven desempeñando el papel de cualquier función social que implique un compromiso de valor positivo.

¿Cómo adquiere el joven una identidad moral? ¿Por qué no la adquiere? La formación de una identidad moral entraña un largo proceso de crecimiento, donde confluyen miles de pequeñas vías y aportaciones: respuestas de los demás; observaciones de actividades ajenas que atraen o repugnan; reflexiones sobre la propia experiencia; influjos culturales provenientes de la familia, la escuela, las instituciones religiosas y los medios de comunicación de masas. La importancia relativa de estos factores varía de un niño a otro.



3. EMPAQUETANDO PRODUCTOS ALIMENTICIOS para unos almacenes de New Jersey. Los padres pueden facilitar a sus hijos experiencias parecidas de ayuda y solidaridad que eduquen el talante moral.

Educa bien a tus hijos

Para la mayoría de los niños, la fuente inicial de directriz moral son los padres. Diana Baumrind, de la Universidad de California en Berkeley, ha demostrado que los padres que educan "con prudente autoridad" facilitan el desarrollo moral de sus hijos mejor que los padres "permisivos" y que los "autoritarios". La autoridad bien entendida establece unas reglas familiares coherentes y fija unos límites a la conducta, pero también promueve el abrirse a la comunicación y a la discusión, a las explicaciones claras; si se justifica la revisión de las reglas, está dispuesta a revisarlas. En cambio, la permisividad deroga las reglas y el autoritarismo refuerza las reglas a capricho de los padres (es el famoso "¡Porque lo digo yo!").

Por opuestos que puedan parecer, la permisividad y el autoritarismo de los progenitores tienden en realidad a producir en los niños similares tipos de poco autocontrol y escasa responsabilidad social. Ninguna de las dos modalidades ofrece a los niños expectativas realistas ni directrices estructuradas que les animen a ampliar sus horizontes morales. Ambas pueden fomentar habituaciones —por ejemplo, a creer que las formas de conducirse vienen de fuera— que impedirían el desarrollo de la identidad moral. Así, la conducta moral o inmoral del adulto tiene frecuentemente raíces en su experiencia infantil.

Los niños, al ir creciendo, van estando cada vez más expuestos a influencias extrafamiliares. Pero en la mayoría de las familias, la relación entre los padres y el hijo sigue siendo la más importante mientras el menor vive en el hogar. El comentario de uno de sus progenitores sobre lo indecente de una cancioncilla o lo inadmisible de un vídeo violento suele seguir impresionando al hijo mucho tiempo después de haber éste olvidado su mediática experiencia. Al fin y al cabo, si esos programas televisivos abriesen la puerta a responsables enseñanzas de los padres, tal vez los beneficios serían muy superiores a los daños.

Una de las cosas más positivamente influyentes que los padres pueden hacer es animarles a que tengan buenas relaciones con otros chicos de su edad. El trato con los de su misma edad puede contribuir al desarrollo moral del niño ayudándole a caer en la cuenta del conflicto entre sus ideas preconcebidas y la realidad social. Durante la discusión sobre cómo repartirse el chocolate, algunos de nuestros sujetos parecían irse haciendo nuevas —y más claras— ideas de la justicia. En un estudio de seguimiento confirmamos que el debate entre iguales había ayudado a cada niño a adquirir mayor conciencia de los derechos de los demás. Y los que participaron activamente en el debate, expresando sus opiniones y escuchando con atención las de los otros, fueron probablemente los que más se beneficiaron.

En la adolescencia, el trato con los de la misma edad resulta decisivo para forjar la identidad personal. A veces el proceso de las interacciones acaba en un comportamiento social exclusivista; constituido en medio de definir y apuntalar su propia identidad, los muchachos sólo buscan la compañía de quienes coinciden con ellos en edad y en ideas, y desprecian a otros que les parecen extraños. Pero, cuando se mantiene dentro de unos límites razonables, el agrupamiento por homogeneidad evoluciona hasta convertirse en una forma de amistad más madura. ¿Qué pueden hacer entre tanto los padres

para fortalecer a un adolescente que esté aguantando la adversidad del aislamiento o el acoso? Deben aconsejarle que piense que la conducta cruel revela la catadura del que la perpetra, no la personalidad de la víctima. Si esta reflexión le ayuda a resistir, el período de acoso pasará sin dejar cicatrices en su psiquismo.

Algunos psicólogos, adoptando un enfoque sociológico, examinan variables de ámbito comunitario; por ejemplo, si las influencias morales —de los padres, de los maestros, de los medios informativos y otras— son coherentes entre sí. Estudiando a 311 adolescentes de 10 poblaciones de los EE.UU., Francis A. Ianni, de la Facultad de Pedagogía de la Universidad de Columbia, encontró muchos grados de conducta altruista y pocos de conducta antisocial entre los muchachos de las comunidades en que había consenso sobre lo que debía esperarse de la juventud.

En esas poblaciones todos estaban de acuerdo en que la honradez, por ejemplo, es un valor fundamental. Los profesores no toleraban trampas en los exámenes, los padres no permitían que sus hijos mintiesen y se librasen de ser castigados por ello, los entrenadores no incitaban a sus equipos a quebrantar el reglamento para ganar el partido, y todo el mundo, sin distinción de edades, esperaba de sus amigos llaneza y sinceridad. En cambio, en otras muchas comunidades no había acuerdo general sobre estas cosas: los entrenadores querían por encima de todo la victoria de su equipo, y los padres protestaban cuando los profesores reprendían a sus hijos porque habían hecho trampas en las pruebas o chapuzas al realizar las tareas. En tales circunstancias, los niños aprendían a no tomarse en serio los mensajes morales.

Al conjunto de criterios compartidos por todos en las comunidades del consenso le dio Ianni el nombre de "carné de la juventud". Ni la diversidad de etnias y culturas, ni el nivel socioeconómico, ni el emplazamiento geográfico, ni el número de habitantes tenían nada que ver con el que una población ofreciera o no a su gente joven una norma fija de moralidad. La idea matriz del carné de la juventud es ahora objeto de exploración en actuaciones sociales que fomentan la comunicación entre los niños y la de ellos con sus padres, con sus maestros y con los demás adultos que les influyen. Entre tanto, otros investigadores han tratado de aclarar si los valores específicos dependen del trasfondo cultural, del sexo o de diferencias generacionales.

Por desgracia, los conceptos encerrados en el carné de la juventud se van haciendo cada día más raros en los EE.UU. Los propios adultos a quienes les preocupa este proceso se inhiben. Los padres andan siempre demasiado ocupados y, a menudo, en total ignorancia de la no menos ajetreada vida que llevan sus hijos; les dan a los adolescentes más autonomía que la que se les diera nunca y, claro está, los jóvenes la esperan... y hasta la exigen. Por su parte, los maestros piensan que la vida extraacadémica del alumno no les incumbe y temen ser censurados, si no demandados ante los tribunales, por intervenir en sus problemas personales o morales. Y los vecinos piensan del mismo modo: que no deben entrometerse en los asuntos de otra familia por más angustiado o en apuros que les parezca estar uno de sus pequeños.

Todo cuanto los psicólogos han averiguado estudiando el desarrollo moral de los niños indica que las múltiples influencias sociales que guían a un niño coherentemente en una misma dirección ayudan a que se forme bien su identidad moral, que es la clave para que el individuo se comprometa a actuar moralmente durante toda su vida. Los niños deben oír el mensaje de esas influencias con nitidez suficiente para que les cale. Las sociedades del futuro, pluralistas, habrán de afrontar la difícil búsqueda de una base común lo bastante amplia como para comunicar desde ella el sistema compartido de valores que los jóvenes necesitan.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MORAL CHILD: NURTURING CHILDREN'S NATURAL MORAL GROWTH. William Damon. Free Press, 1990.

ARE AMERICAN CHILDREN'S PROBLEMS GETTING WORSE? A 13-YEAR COMPARISON. Thomas M. Achenbach y Catherine T. Howell en *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, vol. 32, n.º 6, páginas 1145-1154; noviembre de 1993.

SOME DO CARE: CONTEMPORARY LIVES OF MORAL COMMITMENT. Anne Colby. Free Press, 1994.

THE YOUTH CHARTER: HOW COMMUNITIES CAN WORK TOGETHER TO RAISE STANDARDS FOR ALL OUR CHILDREN. William Damon. Free Press, 1997.

PERFILES

Gary Stix

MARIO R. CAPECCHI: Supervivencia y ciencia

De pícaro callejero en la Italia de la posguerra a "inutilizar" los genes de los ratones. Mario R. Capecchi es la prueba de que el genio surge donde menos se espera.

En 1996, la Fundación Inamori le pidió a Capecchi que en su discurso de aceptación del prestigioso premio Kyoto repasara su vida y su trabajo. Cumpliendo esa norma, muy extendida en tales acontecimientos, Capecchi describió su paciente investigación sobre un método muy preciso para insertar o suprimir genes de los ratones. Pero la parte más conmovedora de su disertación no tenía nada que ver con ratones quiméricos ni con selecciones positivas o negativas. Eran recuerdos de infancia en los que podría inspirarse el actor y director italiano Roberto Benigni para realizar una segunda parte, mejorada, de *La vida es bella*.

Capecchi es la estampa viva de que la creatividad científica y el genio pueden aparecer en las circunstancias más improbables. Poco más de 15 años separaban al doctorando Capecchi, cuya tesis dirigía el premio Nobel James D. Watson, del rapaz de ocho años que aplicaba esa misma cabeza para sortear la muerte por las calles de una Italia hundida.

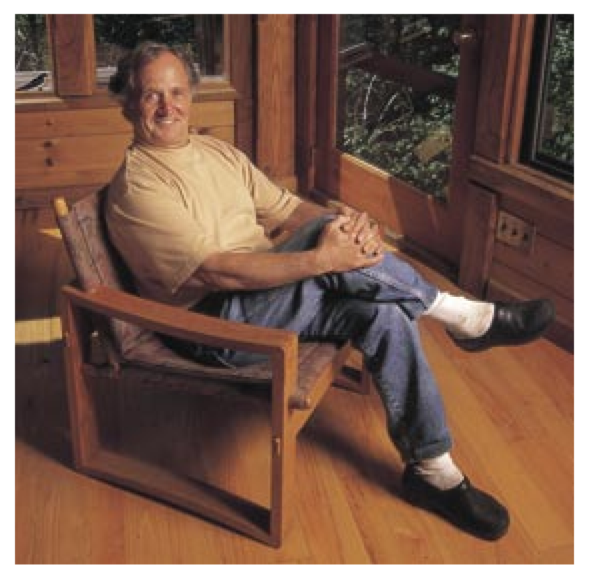
Capecchi nació el 6 de octubre de 1937 en Verona, fruto de un amorío pasajero entre un piloto italiano y una poetisa norteamericana. En 1941 la Gestapo arrestó a su madre y la envió al campo de concentración de Dachau. Hitler creía que al igual que judíos, gitanos y homosexuales, los bohemios, un grupo de artistas que se oponían al nazismo y al fascismo, debían ser extirpados de la sociedad. Anticipando su deportación, Lucy Ramberg vendió sus posesiones y le entregó las ganancias a una familia campesina tirolesa para que cuidara de Mario, de sólo tres años y medio.

Durante un tiempo, las cosas fueron todo lo bien que podía esperarse en medio de la guerra. En el campo, el chico observaba la cosecha del trigo y pisaba las uvas en la vendimia. Uno de sus primeros encuentros directos con la guerra se produjo cierta tarde en la que aviones norteamericanos ametrallaron a los campesinos en plena faena. Una bala alcanzó a Capecchi en la pierna, pero la herida se curó pronto.

Pasado un año, el dinero de su madre se acabó inesperadamente, y el muchacho fue abandonado en la calle. Capecchi sospecha que su padre pudo haber engañado a sus cuidadores para llevarse el resto del dinero. Así comenzó para el niño una odisea que marcaría su vida y cuyos efectos persisten hasta hoy. Apenas si mide 1,64, quizá 20 centímetros menos de lo que hubiera llegado a ser si hubiera tenido para comer durante los años del estirón.

Desde 1942 hasta 1946, Capecchi salía de un orfanato y entraba en otro. Conoció el hospital y lo apuntaron en la Balilla, la organización juvenil de Mussolini. Esos lugares, usualmente escasos de comida y dirigidos por patrones dickensianos, resultaron más arduos que buscarse la vida por las calles. De manera que pasaba la mayor parte del tiempo urdiendo cómo escapar. En el exterior, vivía en edificios bombardeados tramando con sus compinches el robo de pan y fruta de los puestos al aire libre. Era la mejor existencia posible, a pesar de tener que protegerse a sí mismo con sus puños y verse obligado a contemplar frecuentes atrocidades o sus resultados, como cuando descubrió un montón de cuerpos desgarrados. A veces acudía a ver a su padre, Luciano Capecchi, que le alojaba por un tiempo, para no tardar en echarle. "No era ningún encanto de padre", recuerda.

El día que cumplía nueve años, se presentó una mujer que no reconoció en el hospital donde estaba asilado en Reggio Emilia, una ciudad del norte de Italia. Lo habían internado a causa de su estado de desnutrición, pero en el hospital sólo le daban un tazón de achicoria y un chusco de pan negro una vez al día. La mujer tenía un aspecto mucho más anciano que el vago recuerdo que conservaba de su madre, pero a Capecchi poco le importaba si era ella o no. Sólo sabía que era su salvoconducto hacia la libertad. La vida en el hospital consistía en pasar días interminables tumbado desnudo en una cama mirando al techo, consumido por las fiebres provocadas por el hambre. Tres semanas más tarde —un período que le proporcionó la seguridad de que su orfandad había terminado— madre e hijo embarcaban hacia América.



1. Abandonó una plaza de profesor en Harvard en busca de los espacios abiertos de Utah: eso hizo Mario R. Capecchi

En el transcurso de breves semanas, Capecchi pasó de una civilización hundida al severo ambiente moral de una comunidad cuáquera, donde él y su madre se establecieron con su tío y su tía, 30 kilómetros al norte de Philadelphia.

Su tío, Edward Ramberg, un físico que trabajaba en óptica electrónica en el Laboratorio RCA de Investigación de Princeton, era un objetor de conciencia que rechazó luchar en la contienda o colaborar en tareas logísticas. Ese matrimonio sin hijos adoptó al chico, relevando a su madre, aún atemorizada por su estancia en Dachau, de sus responsabilidades. "Su misión consistió en hacer de mí

un ser social, y fue toda una proeza”, señala Capecchi, con una voz que retiene un ligero deje italiano.

El muchacho entró en tercer curso de la escuela pública local sin saber palabra de inglés, leer ni calcular. Lo único que dominaba el nuevo agregado a la comunidad cuáquera era pelear. “Me dediqué a zurrar a todo el mundo. Eso estableció mi propia demarcación y me proporcionó cierta ascendencia social”, relata, con la pierna, embutida en unos vaqueros, colgando del brazo de su sillón, dejando ver el pie calzado con un zueco negro.

Gradualmente, desplazó su agresividad a los deportes, en particular la lucha, y alcanzó el nivel académico de sus compañeros. Abandonó su coqueteo con el atletismo y se puso manos a la obra con la sencilla elegancia de las ciencias físicas, que encerraban un gran atractivo para alguien cuya vida había sido cincelada en el caos de la guerra. En el transcurso de una tanda de seminarios le envolvió la excitación por el nuevo campo de la biología molecular. Más tarde, durante una entrevista de admisión para un programa de doctorado en la Universidad de Harvard, le preguntó tímidamente al profesor Watson dónde debería realizar su tesis de grado. “Estarías loco de atar si te fueras a otro lado”, recuerda que le dijo Watson. Recibió su doctorado tras haber ahondado en trabajos de síntesis de proteínas en el laboratorio de Watson. Pasó luego cuatro años contratado en el departamento de bioquímica de la Facultad de Medicina de Harvard.

Capecchi hizo entonces algo que a sus colegas les parecía un acto de locura, pero que en el contexto más amplio de sus experiencias de reclusión y autoestima resultaba comprensible. En 1973 abandonó la claustrofóbica y politizada atmósfera del complejo de investigación biomédica de Harvard-MIT. Allí respiraba un insufrible aire gregario y monótono. Capecchi aceptó una plaza en la Universidad de Utah. Los abiertos espacios del Oeste le proporcionaron un sentimiento de libertad y un lugar donde continuar la demanda que le hiciera Watson de concentrarse sólo en los problemas de peso de la investigación biomédica. “Creo que estando aislado se tiene la oportunidad de hacer cosas a más largo plazo”, dice.

El deseo de libertad se extiende también a su vida personal. Capecchi ha arreglado una cúpula geodésica de madera, en un terreno de 10 hectáreas en las montañas Wasatch que le compró a un hippie a finales de los años 70. El y su mujer, Laurie Fraser, se demoraron años tras el nacimiento de Misha, su hija, antes de dejar el retrete del cobertizo e instalar cañerías.

Esta veta independiente le ayudó a Capecchi a capear la mayor crisis de su carrera profesional. En 1980 una comisión de asesores del Instituto Nacional de la Salud (NIH) emitió un dictamen acerca de sus estudios sobre sustitución dirigida de genes (desactivar o modificar un gen en embriones de ratón) con un seco “no merece la pena proseguir”. Los asesores juzgaban que era poco probable que un segmento de ADN insertado en una célula pudiera alinearse y reemplazar una secuencia a juego entre los miles de millones de nucleótidos de la célula, y caso de que lo hiciera sería muy difícil de detectar.

Capecchi tomó la decisión de utilizar los fondos de otro proyecto para continuar esta línea de investigación. En 1984 había juntado suficientes pruebas para convencer a los expertos del NIH sobre la eficacia de su técnica. La sustitución dirigida logra soslayar la tendencia de un gen recién introducido a insertarse al azar en el ADN nuclear de una célula. Se vale de la recombinación homóloga, un proceso celular natural en virtud del cual cadenas de nucleótidos de un gen se albergan en secuencias de una célula con las que encajan. Si el gen recién insertado encuentra su diana, se alineará con él y lo reemplazará, aun cuando lleve secuencias alteradas que desactiven un gen o modifiquen su actividad.

Este proceso ocurre sólo en una pequeña fracción de células embrionarias. Los investigadores encontraron la manera de detectar las inserciones de un gen eliminando las células que no lo poseían o que lo tenían insertado en el lugar incorrecto. Ese año el dictamen que realizó el comité asesor de científicos de una nueva petición de fondos para el laboratorio de Capecchi comenzaba diciendo: “Nos alegramos de que no siguiera nuestras exhortaciones.”

La técnica básica de sustitución dirigida de genes —que por caminos paralelos perseguía Oliver Smithies, de la Universidad de Carolina del Norte— se ha convertido en el procedimiento fundamental para averiguar la funcionalidad de un gen concreto en los mamíferos. Se han publicado miles de artículos en los que se ha bloqueado un gen de ratón para determinar los defectos genéticos resultantes, como el desencadenamiento de un proceso que acabe en un cáncer, por ejemplo.

En los últimos años el principal interés de Capecchi se ha concretado en utilizar todas las técnicas de inutilización para seguir el curso del desarrollo nervioso de los ratones. Su grupo, integrado en el Instituto Médico Howard Hughes, investiga de qué manera los genes homeobox involucrados en la programación del desarrollo embrionario pueden producir los miles de tipos de neuronas diferenciadas a partir de un puñado de células cerebrales. “Lo que nos estamos preguntando es cómo fabrica el embrión un cerebro. Si se sabe de qué piezas consta, se comprende cómo funciona”, dice.





2. La madre y el tío de Capecchi rescataron al chico de los horrores de la posguerra

Capecchi no prevé la jubilación en los próximos 15 años. “Mi mujer dice que voy a morirme en el laboratorio.” Pase lo que pase, la historia de su vida constituye ya un testimonio del mensaje que Capecchi intentó transmitir a los japoneses que le escuchaban. Los genios deberían buscarse lo mismo en casas exquisitas que en las cabañas. La sociedad debe encontrar la manera de reclutar y de educar a sus parias, incluso a los pilluelos malnutridos y analfabetos que vagan por las calles. “Da igual que uno se crea muy listo”, subraya, “no se puede predecir quiénes son los que van a descollar”. Insólitos comienzos pueden dar lugar a vidas extraordinarias.

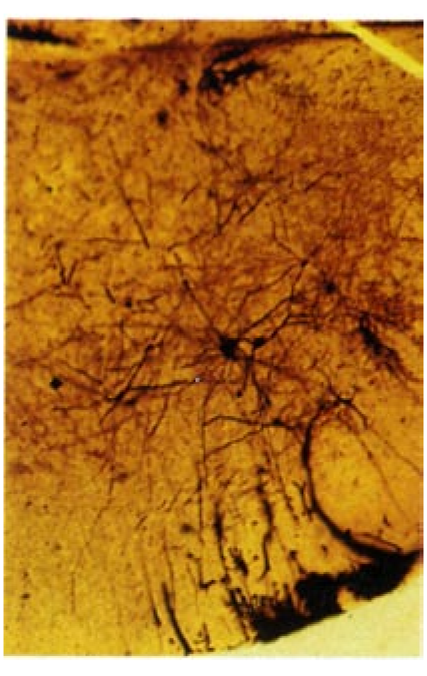
Ciencia y sociedad

Hace 100 años

Cajal y la corteza cerebral

Hace cien años Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) publicó una serie de artículos científicos en los que se describía la organización de la corteza cerebral humana. Ubicada en la superficie externa del cerebro, la corteza es una estructura laminar, donde las células se disponen en capas horizontales (capas 1-6). La corteza está formada por miles de millones de células (neuronas y neuroglía), fibras nerviosas intrínsecas y extrínsecas (según se originen en neuronas de la propia corteza o externas a ella, respectivamente) y vasos sanguíneos. Tiene una superficie total de aproximadamente 2200 cm^2; se divide en áreas de citoarquitectura y función diversas y cuyo espesor varía entre 1,5 mm y 4,5 mm. El volumen total de la corteza se cifra en 600 cm^3 y se calcula que hay 1000 millones de sinapsis por milímetro cúbico.

La información procesada en la corteza sale de la misma a través del axón de las células piramidales, para alcanzar otras regiones corticales o centros subcorticales. Estas células piramidales constituyen aproximadamente el 75 % de la población neuronal. Se trata de células excitadoras cuyas dendritas se hallan recubiertas, en la mayor parte de su superficie, por espinas dendríticas, unas pequeñas protuberancias descubiertas por Cajal. El 25 % de la población neuronal restante está constituido por las interneuronas o neuronas cuyo axón permanece dentro de la corteza. Existe una amplia variedad de tipos morfológicos de interneuronas; en su mayoría carecen de espinas dendríticas (interneuronas sin espinas) y son inhibidoras, es decir, controlan la actividad de las células piramidales.



1. "Reazione nera" en la médula espinal. Preparación original del laboratorio de Camillo Golgi

La corteza cerebral se halla implicada de forma directa en diversos aspectos del comportamiento de los mamíferos. Es la estructura más humana del sistema nervioso, pues se encuentran allí las capacidades que distinguen a los humanos del resto de los mamíferos; por ejemplo, el habla y la facultad de abstracción. Su estudio reviste, en consecuencia, el máximo interés.

Antes de los estudios de Cajal, el conocimiento de la estructura de la corteza cerebral era muy pobre. Se creía que las fibras nerviosas nacían de la "sustancia gris", independientes de las células nerviosas. Aunque se reconocían diversos tipos de neuronas, los métodos disponibles de tinción para observarlas al microscopio apenas si permitían distinguir la morfología de las mismas; se ignoraban por entero las conexiones entre las células nerviosas. No podía ni siquiera imaginarse la existencia de circuitos corticales.

Así las cosas, en 1873 apareció un nuevo método de tinción (*reazione nera*), descubierto por Camillo Golgi (1843-1926). La aplicación de este método al estudio del sistema nervioso representó un paso fundamental en el análisis de su organización, al ofrecer la visualización microscó-



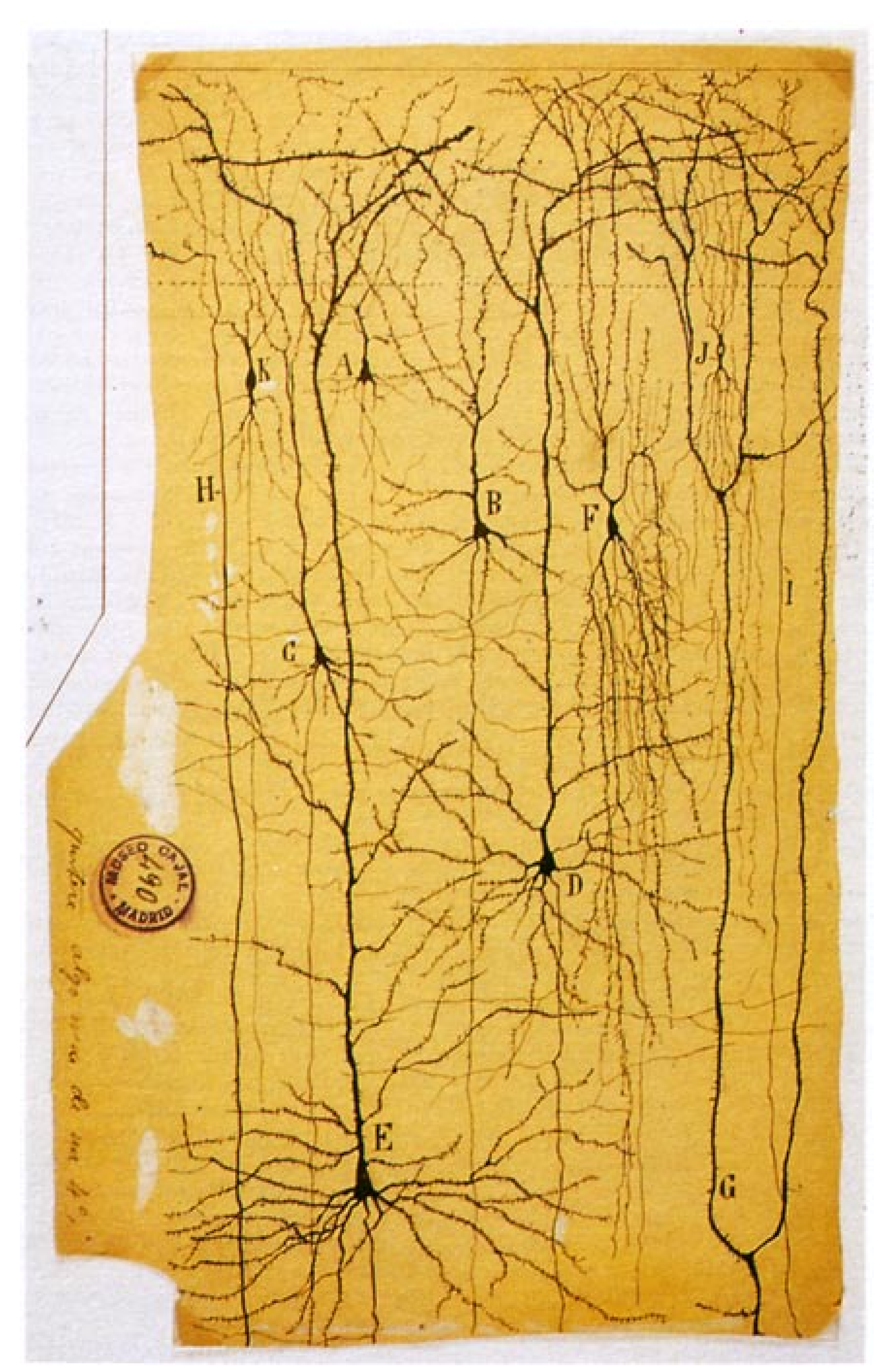
2. Fotografía de uno de los preparados histológicos de corteza cerebral elaborado por Santiago Ramón y Cajal que viajó al espacio durante la misión Neurolab de la NASA. Museo Cajal, Instituto Cajal (CSIC)

pica completa de la neurona; se teñía en negro el cuerpo celular con sus prolongaciones (dendritas y axón). El método de Golgi aportaba otra gran ventaja: en cada preparación histológica se teñían sólo un pequeño número de neuronas, lo que permitía la observación de las neuronas una por una. Así se pudo identificar y clasificar los distintos tipos neuronales y, especialmente, analizar las conexiones intrínsecas o locales de las diferentes partes del sistema nervioso. Golgi por inventar la técnica y Cajal por la interpretación de los datos al aplicarla al estudio del sistema nervioso recibieron, en 1906, el premio Nobel en fisiología y medicina.

Cajal destacó por su gran capacidad de observación e inteligencia clara para interpretar las imágenes microscópicas del cerebro. Cuando analizaba una preparación histológica "veía" detalles que muchos otros, que disponían de los mismos microscopios y de las mismas preparaciones, no percibían. Lo vemos confirmado en uno de sus grandes hallazgos, el de las espinas dendríticas realizado con el método de Golgi. Para Cajal estas estructuras representaban un elemento clave en la fisiología de las células piramidales. Para otros, así Rudolf Albert von Kölliker (1817-1905) e incluso Golgi, las espinas eran un artefacto del método, producido por una suerte de cristalización en agujas que se depositaba sobre la superficie de las neuronas.

Las espinas dendríticas constituyen hoy objeto de intensa investigación. Representan el principal sitio postsináptico, en donde se establecen las sinapsis excitadoras, e intervienen en la plasticidad del cerebro, es decir, en su capacidad de adaptación en respuesta a lesiones, procesos degenerativos o la propia experiencia. Gracias a los estudios de Cajal, se empezaron a trazar así los primeros circuitos corticales, lo que es indispensable para estudiar cómo funciona el cerebro.

La neurobiología considera a Cajal uno de sus fundadores por el impulso que dio al conocimiento de la estructura del sistema nervioso en general y del cerebro en particular. En línea con ese reconocimiento, el año pasado se le rindió un homenaje durante el vuelo espacial de la misión Neurolab, la primera consagrada al estudio del sistema nervioso fuera de la atmósfera terrestre para investigar la adaptación del cerebro a la microgravedad. En el vuelo del *Columbia* de la primavera de ese año de 1998 viajaron 12 preparaciones histológicas y 9 dibujos de Cajal. Acompañaron a 152 ratas, 18 ratones, 1514 grillos, 223 peces y 135 caracoles. Dos laboratorios del Instituto Cajal, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, participan en el estudio de los efectos del vuelo espacial sobre el desarrollo de los circuitos sinápticos de la corteza cerebral y del hipotálamo.



3. Fotografía de uno de los dibujos de Santiago Ramón y Cajal que voló con la misión Neurolab. En este dibujo se ilustran algunos de los diversos tipos de neuronas teñidas con el método de Golgi que componen las capas 1-3 de la corteza cerebral humana. Museo Cajal, Instituto Cajal (CSIC)

La opinión dominante en los tiempos de Cajal, que aún persiste, y según la cual la diferencia entre la corteza cerebral del hombre y de otros mamíferos sería meramente cuantitativa, le parecía "improbable y hasta

un poco atentatoria a la dignidad humana". Cajal pensaba que la corteza cerebral humana debería presentar unas características particulares y cualitativamente diferentes que explicasen la existencia de aspectos tan singulares y evolucionados como la capacidad de abstracción, el lenguaje, etcétera. Cuenta en *Recuerdos de mi vida*: "Microscopio en ristre lancéme pues, con mi habitual ardor, a la conquista de la pretendida característica anatómica del rey de la Creación, a la revelación de esas enigmáticas neuronas estrictamente humanas, sobre las que se funda nuestra superioridad zoológica." Tras describir con exquisita precisión la morfología de las células piramidales e interneuronas localizadas en distintas capas de la corteza cerebral, la organización de los plexos nerviosos originados por las fibras extrínsecas, las posibles conexiones intracorticales y un largo etcétera de elementos de enorme interés para conocer la microanatomía de la corteza, llegó a la conclusión de que la superioridad funcional de la corteza cerebral humana estaba íntimamente relacionada con la inmensa cantidad y variedad de interneuronas.

Aunque seguimos sin conocer las características microanatómicas fundamentales que distinguen a la corteza humana del resto de los mamíferos, los estudios de Cajal iniciados hace 100 años han supuesto el punto de arranque para el estudio de esta fascinante región del cerebro humano.

JAVIER DEFELIPE
Instituto Cajal (CSIC), Madrid

Chips de cubits

Una pastilla superconductora indica el camino hacia la computación cuántica a media escala

Durante años los físicos se han venido aplicando al estudio de los ordenadores cuánticos, dispositivos que prometen superar las capacidades teóricas de los ordenadores habituales explotando la naturaleza cuántica de la realidad. Algunos laboratorios han construido incluso modelos de operación de bits cuánticos o "cubits", los elementos fundamentales de un ordenador cuántico, usando iones atrapados en cavidades especiales o técnicas de resonancia magnética nuclear. Pero la mayoría de estos sistemas de cubits de sobremesa hacen que las pesadas válvulas de vacío de la era del ENIAC nos parezcan en comparación de una esbeltez sublime, aparte de robustas y fáciles de interconectar. (Un contemporáneo del ENIAC, el Harvard Mark II, en una ocasión sufrió una perturbación por un insecto real volando en un relé; los bits cuánticos tienden a derrumbarse como un castillo de naipes con el impacto de un fotón superfluo.)

El grupo encabezado por Yasunobu Nakamura, de los Laboratorios de Investigación Fundamental de NEC en Tsukuba, acaba de mostrar un cubit a escala nanométrica construido sobre una pastilla de silicio. El dispositivo combina las propiedades de un punto cuántico —una caja tan pequeña que la mera adición de un electrón representa un cambio significativo— con la pureza cuántica del estado superconductor, en el que la electricidad circula sin resistencia.

A la vista del éxito obtenido por la microelectrónica en la transformación del mundo moderno, parece natural que se piense en diseños basados en silicio para los circuitos cuánticos. Mas no se trata de una tarea fácil. La propiedad esencial de un cubit es su capacidad para existir no sólo en los dos estados binarios normales, 0 y 1, sino también en una superposición arbitraria de ambos. La potencia de cálculo de un ordenador cuántico derivaría de semejante indeterminación; ejecutaría de una vez un algoritmo con números diferentes, sirviéndose de tantos (cu)bits cuantos necesitaría un ordenador normal para realizar el cálculo para un solo número.

Pero los electrones en los semiconductores pueden ocupar un intervalo amplio de estados cuánticos; además, no se da una superposición nítida de dos estados, sino una mezcolanza incoherente de miles de ellos. El punto cuántico es una solución, porque sus confines cortantes separan en niveles discretos la línea de continuidad de estados electrónicos, haciendo mucho más fácil la distinción de dos estados para 0 y 1. Aun así, sigue siendo un problema la pérdida de coherencia cuántica en menos de un nanosegundo, aunque un reciente trabajo, que utiliza los espines de los electrones, sugiere una solución.

El método de Nakamura y sus colaboradores, presentado en *Nature*, utiliza un punto cuántico superconductor para solucionar estos problemas. En un superconductor los electrones pertinentes se unen para formar pares de Cooper, que se acumulan todos en un mismo estado cuántico (un condensado de Bose-Einstein de pares electrónicos).

El punto cuántico es un dedo fino de aluminio depositado sobre una capa aislante del chip. El aluminio es superconductor a la temperatura de trabajo del dispositivo: tres centésimas de grado kelvin por encima del cero absoluto. Dos pequeñas uniones conectan el punto a una reserva mayor de aluminio. Se aplica un voltaje que alinea los niveles de energía en el punto y en la reserva, de manera que un par de Cooper avance y recule, por efecto túnel, de la reserva al punto. Esto forma el 0 y el 1 del dispositivo: la ausencia o presencia de un par de Cooper suplementario en el dedo, que se conoce entonces como caja de un par simple de Cooper.

Mediante un pulso de voltaje para excitar el par de Cooper a una superposición se comprueba si el dispositivo tiene las propiedades cuánticas correctas; la duración del pulso controla las proporciones relativas de 0 y 1 que se crean. Cuentan con indicios de que su cubit retiene sus propiedades un tiempo máximo de dos nanosegundos, suficiente para que sus pulsos de voltaje conmuten su estado aproximadamente 25 veces.

Michel Devoret, jefe del grupo de cuantrónica del Centro de Investigaciones de Saclay, califica este trabajo como "un logro fantástico. Esta es la pieza clave en un rompecabezas que ha tardado varios años en poder completarse". Dmitri Averin, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, cree que este tipo de cubit es óptimo para desarrollar ordenadores cuánticos de complejidad media, lo que sería un paso importante en el difícil camino hacia los ordenadores cuánticos a escala real, y quizá de utilidad para funciones menos exigentes, como el aumento de la seguridad de un canal cuántico de comunicaciones.

Estos objetivos, sin embargo, aún quedan lejos. El siguiente paso consistirá en estudiar cómo aumentar el tiempo de vida de un cubit y comenzar a interconectarlos para fabricar puertas lógicas sencillas.

GRAHAM P. COLLINS

Aerodinámica

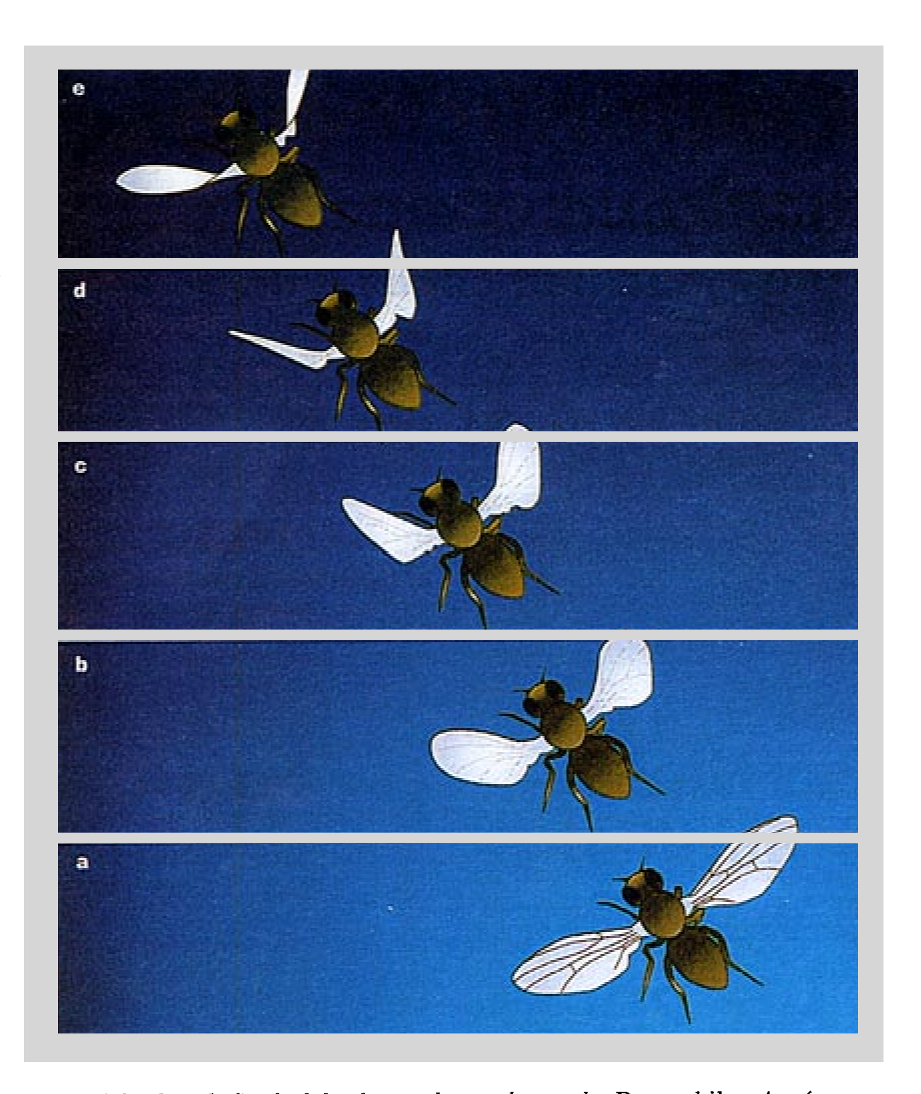
El vuelo de la mosca

Los insectos son, con mucho, las máquinas voladoras más antiguas y numerosas; también las menores. M. H. Dickinson y su equipo acaban de llenar un vacío importante en nuestro conocimiento de las técnicas aerodinámicas, tan insólitas cuan eficaces, de los insectos. Con una mosca del vinagre robot, dotada de alas, el grupo encabezado por Dickinson muestra que las alas generan pulsos transitorios de fuerza ascensional cuando giran en el ápice o en el fondo de cada aleteo. Su aportación no se limita al campo de la aerodinámica, sino que ayuda también a apuntalar una teoría general del vuelo de los insectos.

Igual que los helicópteros, pero no los aviones, los insectos aguantan su peso, toman autoimpulso y controlan posición y maniobra mediante la agitación de sus alas con relación al cuerpo y acelerando una masa de aire dirigida de forma precisa: en descenso vertical en vuelo cernido o en descenso oblicuo en vuelo hacia delante, hacia atrás o hacia los lados. Las palas de los helicópteros rotan alrededor de un eje más o menos vertical. Los insectos, que no poseen cojinetes rotatorios, inducen la oscilación y giro de sus alas; con ese comportamiento aseguran que el ciclo del aleteo cree una fuerza aerodinámica provechosa.

La teoría aerodinámica clásica suponía fijas las alas en un flujo uniforme de aire. Sabemos, desde hace ya un cuarto de siglo, que el flujo de aire que rodea a los insectos no es uniforme; pese a ello, recurren a todo tipo de artimañas aerodinámicas para conseguir niveles de sustentación notables. La investigación reciente se ha empeñado en desentrañar los mecanismos implicados.

Al volar, los insectos baten las alas hacia abajo en relación al cuerpo; después, las doblan hacia atrás en torno al eje longitudinal; luego, las baten hacia arriba; por fin, las doblan hacia delante. En el aleteo distinguimos así una fase de traslación descendente y otra ascendente (en realidad suelen ser aleteos oblicuos e incluso horizontales). Los breves períodos de giro o doblez en los extremos superior e inferior del aleteo constituyen las fases de torsión.



Giro del ala al final del aleteo descendente de Drosophila. *Aquí* a *corresponde al punto medio del aleteo descendente,* d *es el punto final, y en* e *el ala está iniciando el aleteo ascendente. La rotación inversa empieza en* c *antes de que el ala alcance el fondo del aleteo; el grupo encabezado por Dickinson demuestra que ello genera un pulso enérgico de poderosa sustentación aerodinámica hacia el final de este hemiciclo. Cuando el ala vigorosamente doblada empieza a moverse arriba y atrás* (e) *se crea un segundo pulso de sustentación enérgica, debido, tal parece, a que las alas interceptan y captan los restos de la estela del aleteo descendente. La secuencia que se muestra aquí se ha dibujado a partir de una película de alta velocidad de un insecto en vuelo libre tomada por A. R. Ennos*

Las alas generan la fuerza de sustentación mediante la creación de vórtices: flujos de aire en trayectoria circular alrededor de un eje. De entre los vórtices resulta crucial el vórtice de presión, que se forma alrededor de la misma ala, acelerando la masa del flujo de aire sobre la lámina superior del ala, frenándola en la parte inferior, acelerándola en la zona posterior y creando una diferencia de presión entre las superficies superior e inferior que tiende a tirar del ala hacia arriba. Cuanto más violenta sea dicha circulación, mayor será el nivel de sustentación, con el aumento consiguiente del ángulo de ataque, formado por el ala y el flujo que llega. Se prosigue en esa situación hasta que se alcanza el ángulo de pérdida de velocidad crítico, lo que ocurre cuando el flujo de aire se aleja de pronto de la lámina superior del ala y desaparece la sustentación.

Si un ala se acelera de pronto en un ángulo de ataque muy abierto, se puede retrasar instantáneamente el ángulo de pérdida crítico y generarse una poderosa sustentación gracias a la formación de otro vórtice en la lá-

mina superior del ala, detrás mismo del borde de ataque; ello provoca que el flujo vuelva a la superficie, en vez de alejarse de la misma. Se trata de un fenómeno momentáneo, demasiado breve para encerrar algún significado en el vuelo batido. O al menos eso se creía hasta 1996, fecha en que el grupo encabezado por C. P. Ellington demostró en el esfíngido *Manduca* que el movimiento de aleteo del ala estabilizaba el vórtice del borde de ataque al obligarle a seguir una trayectoria espiral a lo largo del ala y hasta la punta de la misma. Con ello, se retrasa el ángulo de pérdida de velocidad y se mantiene una sustentación vigorosa durante las fases de traslación del aleteo.

El efecto se confirmó mediante combinación de varias técnicas: estereofotografía de la estructura tridimensional de las estelas de los mismos esfíngidos, análisis computacional de dinámica de fluidos, basado en los movimientos observados de las alas, y examen del movimiento de humo alrededor de un gran esfíngido robot que copiaba los movimientos y deformaciones reales de las alas de la polilla auténtica, pero con la frecuencia de batido reducida a escala para asegurar el mismo modelo de flujo. Las investigaciones ulteriores, entre ellas las del grupo de Dickinson, confirman que la demora en la pérdida de la velocidad constituye la principal fuente de sustentación suplementaria en las fases de traslación de aleteo descendente y ascendente de muchísimos insectos.

¿Qué es, pues, lo que ocurre cuando el ala se dobla hacia delante y hacia atrás, alrededor del ápice y del punto inferior del aleteo? Para responder a ello, el grupo de Dickinson empleó otra drosófila robot con alas de plexiglás instrumentadas para medir la fuerza de sustentación y la resistencia al avance; operaba en un depósito de aceite para así remedar el flujo creado en el aire por alas reales. Cuando se hicieron batir y girar las alas para simular el ciclo de aleteo de una genuina *Drosophila*, aparecieron breves pulsos de una fuerza poderosa de sustentación, antes y después del ápice y del fondo de cada movimiento de alas. Tras alterar el modelo con fines experimentales, quedó patente el carácter decisivo del ritmo de la rotación. El primer máximo de sustentación depende de que el ala empiece a girar antes del punto extremo de cada hemialeteo; ello crea un ángulo de ataque muy abierto cuando decelera (*figura*). Viene a ser como dar efecto a una pelota de tenis. El tirón hacia atrás del ala justo antes del final del aleteo descendente acelera el flujo de aire que pasa por la lámina superior (retrogiro), lo que genera el primer pulso de sustentación. El tirón previo al fin del aleteo ascendente oblicuo —en realidad otro tirón hacia atrás— ejerce el mismo efecto.

Hasta aquí, cuanto corresponde al máximo de sustentación antes de la inversión del aleteo. La explicación ofrecida para el pico siguiente resulta, quizá, más llamativa. La rauda velocidad de aleteo de *Drosophila* y su lenta velocidad de vuelo posibilitan que, tras cada inversión, el ala atraviese el aire en rotación que acaba de dejar en el hemialeteo anterior. Mediante la técnica de velocimetría de formación de imágenes de partículas, que nos representa el flujo producido, el grupo de Dickinson ha encontrado indicios de que el ala reanda la senda que acaba de trazar y utiliza su vorticidad residual para generar otro pulso de fuerza de sustentación, a condición, por supuesto, de que el ala haya girado antes de torcer la dirección.

No sabemos hasta qué punto se hayan difundidos estos fenómenos entre los insectos voladores. Pero complementan de un modo harto satisfactorio el recurso al vórtice del borde de ataque en el que se basa el grupo de Ellington para explicar la creación de sustentación a lo largo de todo el ciclo de aleteo. A tenor de los cálculos realizados por el grupo de Dickinson, la sustentación se debe en buena medida a la traslación del ala, sin despreciar la importancia que en ella revisten los breves períodos de giro alar. Además, la dependencia de este componente con respecto al ritmo del giro del ala lo convierten en ideal para iniciar y controlar las bruscas aceleraciones y maniobras que caracterizan el vuelo de las moscas. Cambios menores en el ritmo del giro en el ápice y en la base del aleteo, de una o ambas alas, se dejarían sentir, de un modo casi instantáneo, en la velocidad y la dirección, como ha puesto de manifiesto la filmación a alta velocidad de moscas en vuelo libre. Ahora entendemos cuán difícil es su caza.

ROBIN WOOTTON
Facultad de Biología,
Universidad de Exeter

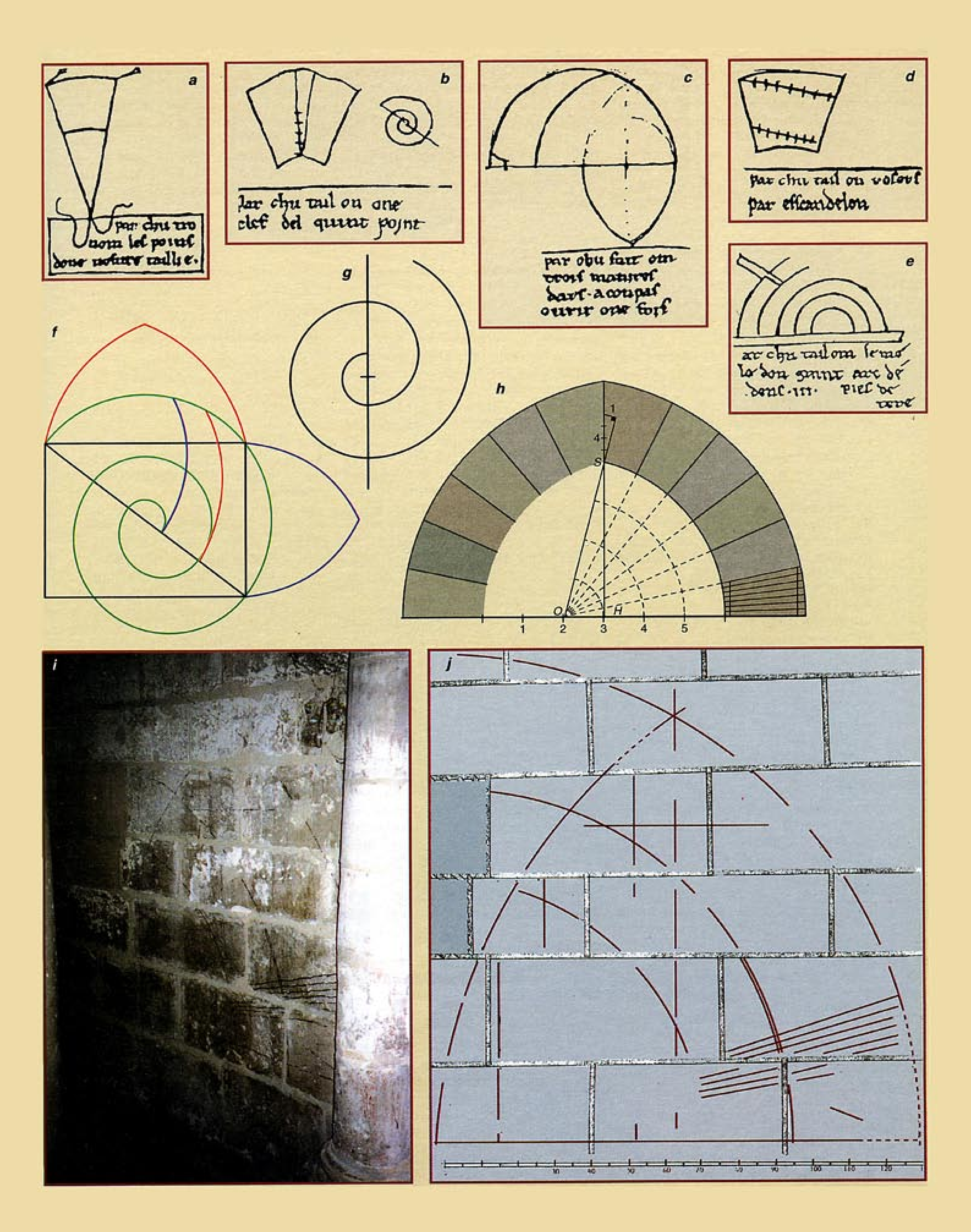
La traza reencontrada

Ciertos trazados sobre los muros confirman que los constructores góticos utilizaban los métodos expuestos en el manuscrito de Villard de Honnecourt

Villard de Honnecourt dejó a la posteridad un cuaderno de 66 páginas que data del siglo XIII y constituye un documento singular sobre las técnicas de los constructores de la Edad Media. A Villard se le han atribuido una veintena de edificios religiosos, aunque no hay pruebas; entre ellos la bellísima colegiata de Saint-Quentin, situada en el Vermandois, la misma región de origen de Honnecourt.

El arquitecto Pierre Bénard en 1864, Robert Branner hacia 1970 y François Bucher después han mostrado la existencia de trazas grabadas sobre los muros de ciertas capillas, particularmente una rosa, similar al rosetón principal de Chartres, de la que hice en 1989 un traslado exacto, y la planta de un pilar, que recuerdan todas ellas dibujos del famoso manuscrito. En 1995, la medievalista Ellen Shortell me señaló la existencia, al pie de una pared sobre la que encontró dibujos de arcos grabados en la piedra, de una pequeña espiral (*g*) idéntica a la representada, al lado de una clave de arco, sobre un croquis de Villard (*b*). Desplazándome al lugar para dibujar este grabado, examiné de cerca los muros de otras capillas. En la primera capilla sur, habiendo despejado el estrecho espacio situado detrás del altar de los objetos de desecho que estorbaban, noté, acariciando la piedra, algunas incisiones continuas.

Una vez limpiada delicadamente la superficie —con ayuda de una brocha— de las eflorescencias de salitre que la cubrían, apareció un conjunto de trazados que representaban tres arcos concéntricos, el mayor de un radio de 129 centímetros. Otro arco, del mismo radio que el mayor, y simétrico, formaba con éste un arco apuntado cuyo vértice y arranques estaban dispuestos según un triángulo equilátero, proporción armoniosa, frecuente en la arquitectura gótica del siglo XIII. Con la ayuda de Bernard Delaire, de la Sociedad Académica de Saint-Quentin, hice, después de haber seguido las incisiones con la


a
b
c
d
e
f
g
h
i
j
S
O
H
1
2
3
4
5

punta de un carboncillo blando, un traslado en verdadera magnitud (*j*). Algunas juntas horizontales y verticales rehechas interrumpen, en ciertas partes, la continuidad de los trazos incisos. Sobre una treintena de centímetros a la derecha, dos arcos que distan cuatro milímetros testimonian una corrección.

Pero lo más notable estaba a la derecha, en la parte baja del paño del muro (*i* y *j*), donde una serie de ocho trazos cercanos, perpendiculares a los tres arcos de círculo, convergían hacia su centro común. Tenía allí, ante mi vista, la aplicación de un procedimiento expuesto en el manuscrito de Villard (*d*) que se representa entre las dos caras convergentes de una dovela, consistente en dos escalas paralelas con un número de divisiones iguales. El comentario es "par chu tail on vosoirs par escandelons", es decir "así se tallan las dovelas por escalones". Uniendo por medio de rectas las divisiones correspondientes a cada escala, el cantero trazaba líneas convergentes, que permitían labrar dovelas de espesores diferentes, según las necesidades. Este sistema evita la búsqueda del centro de la curva, que es a veces inaccesible.

Así, sobre las paredes de una iglesia, vemos aplicados varios croquis técnicos del manuscrito. En una época en la que no había soporte práctico y económico para los planos, ni medios para reproducirlos, lo mejor era exponer sobre los muros, de forma indeleble, los modelos que los compañeros debían ejecutar. Esto es lo que explica uno de los croquis de Villard, donde una especie de zócalo o de cimentación muestra que se trata de una pared vertical (*e*); sobre este croquis, el trazado de varios arcos, como en Saint-Quentin, está explicado por la leyenda: "par chu tail om le mole don grant arc dedens III" (es decir "así se talla el modelo de un gran arco, (con otros) tres dentro"); se precisa a continuación: "pies de tere", que creo se trata de un error de transcripción por "près de terre" (es decir "cerca de tierra"), indicando que estos trazados se hacían en el suelo, sobre una pared vertical, y no sobre un área horizontal, de utilización poco práctica en el trajín de la obra.

La otra confirmación que hemos encontrado en Saint-Quentin de los usos evocados por Villard es la espiral, método para trazar los arcos apuntados de una misma curvatura, permitiendo la estandarización de las cimbras y de las dovelas de un mismo tramo (*f*), o de toda una serie de arcos en una construcción (la utilización de espirales está confirmada por la serie de ellas superpuestas, grabadas sobre una piedra encontrada en Chartres).

La preocupación de los constructores por la estandarización de las curvas está marcada por el croquis, varias veces reproducido, del manuscrito de Villard, mostrando tres arcos trazados con la misma abertura de compás (*c*).

La tercera confirmación, y la más interesante, es el empleo del procedimiento de "escandelons" para trazar las dovelas (*h*). En lo que concierne a las claves, que en los arcos apuntados deben ser tallados según se necesite, Villard nos indica cómo hacerlo (*b*), llevando el ángulo que corresponde a la proporción del arco escogido sobre la clave tipo sin que haya necesidad de buscar el centro de la curva, como lo muestra un croquis de Villard (*a*), lo que es a menudo imposible sobre la pared a trazar, cuya superficie es limitada. El ángulo está definido por la relación entre el radio del arco y la distancia entre el centro de uno de los dos arcos que forman el arco apuntado y el eje de éste (*b*). Aparece representada aquí una clave de "quinto punto", como en el croquis de Villard (*c*). El radio del arco es la hipotenusa *OS* de un triángulo rectángulo *OSH*, cuyo lado menor es la distancia que separa el eje del centro del arco apuntado. El conocimiento de esta relación basta para tallar las dos semiclaves.

Las paredes de las capillas presentan ejemplos de varios procedimientos expuestos en el manuscrito de Villard, siendo la espiral, según se aprecia aquí, un discreto recordatorio del método, en la parte baja de las trazas de ejecución. Esta es la confirmación de procedimientos simples y prácticos empleados entonces por los constructores quienes, por otra parte, como lo muestran otros dibujos del manuscrito, dominaban, en los casos más complejos, la estereotomía, es decir, la "Traza".

Es evidente que los grabados de los muros son antiguos, porque ¿quién se tomaría la molestia de hacer con tanto esmero y precisión estos dibujos geométricos, si no era para mandar ejecutar sus elementos? Sin embargo, el hecho de que tales procedimientos correspondan a los descritos en el manuscrito de Villard, no significa forzosamente que nuestro hombre los haya trazado personalmente, ni que sean exactamente de su época. Lo esencial es ver en ellos confirmados los métodos de los constructores de la Edad Media, indicados en el manuscrito de Villard de Honnecourt.

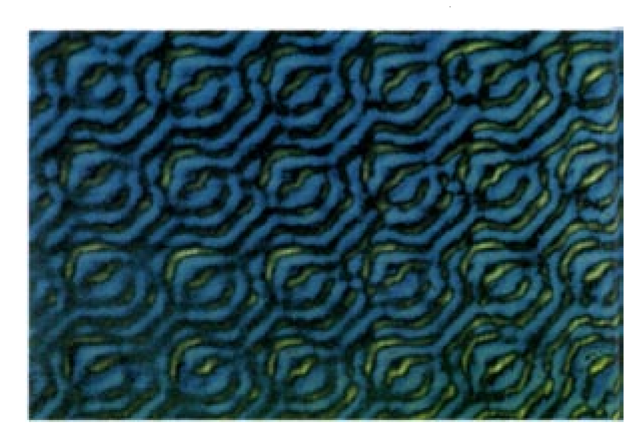
ROLAND BECHMANN

Representación visual de una ley física

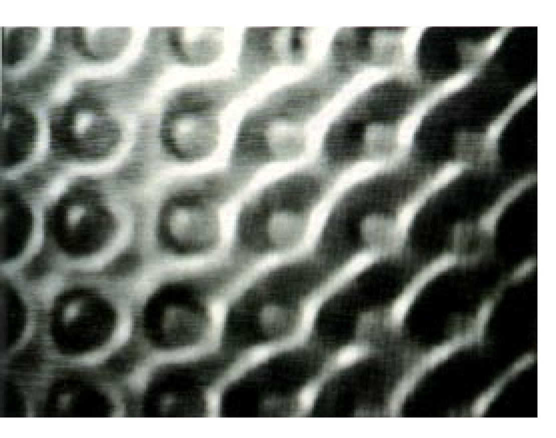
El teorema de Bloch y dominios de ondas

Lo decía Richard Feynman, uno de los físicos más brillantes del siglo y padre de la electrodinámica cuántica. "Si queremos explicar el movimiento de las ondas, no tomemos como ejemplo las ondas superficiales de un fluido: ¡su física es demasiado compleja!". Sin embargo, nosotros hemos utilizado la riqueza de los experimentos hidrodinámicos para ver por primera vez en acción dos de los conceptos fundamentales de la física del siglo XX.

Hemos hecho vibrar entre 20 y 40 ciclos por segundo una vasija que contiene un líquido de baja viscosidad y baja tensión superficial. Su fondo, lejos de ser uniforme, consta de una red cuadrada de pozos cilíndricos. La vasija es una caja cuadrada de metacrilato de 7 cm de lado. Los pozos tienen un diámetro de 3,5 mm, una profundidad de 2 mm y de un pozo a otro media una distancia de 7,5 mm. El líquido cubre someramente el fondo de la vasija.



Onda superficial de un líquido avanzando sobre un fondo con una estructura periódica de pozos cilíndricos



Separación espontánea de dos dominios de ondas superficiales de un líquido, avanzando sobre un fondo periódico, al inclinar imperceptiblemente la vasija

De este modo se generan ondas superficiales en el líquido.

Sabido es que la velocidad de dichas ondas depende de la profundidad del líquido. Nos encontramos, por tanto, con una situación en la que existe un campo periódico de velocidades de onda. Este es exactamente el problema que resuelve el teorema de Bloch, establecido en su origen para explicar el comportamiento de las ondas cuánticas de los electrones en las redes cristalinas.

El teorema de Bloch predice que el movimiento de una onda en una estructura periódica, como la anteriormente descrita, puede interpretarse en forma de una simple onda plana modulada por una función matemática que exhibe idéntica periodicidad que la red por la que avanza.

El teorema en cuestión desempeñó una función crucial en el desarrollo de la física del estado sólido y sus aplicaciones a la electrónica de semiconductores. Nuestros experimentos hacen visible la modulación matemática de la superficie del fluido prevista por el teorema de Bloch, mostrando unas bellas imágenes plásticas reminiscentes del arte conceptual minimalista. No en vano dicho teorema y el movimiento plástico de la Bauhaus son hijos de una misma época.

Por otro lado, las ondas matemáticas de Bloch son muy sensibles frente al desorden. Si la estructura periódica por la que avanza la onda se aparta ligeramente de la perfección, surge un nuevo fenómeno, la así llamada localización de Anderson, según la cual las ondas pierden su carácter de estados infinita y regularmente extendidos y muestran conspicuas discontinuidades.

El fenómeno de localización ha escapado siempre a la observación física directa, lo que descartaba su estudio directo. En nuestro experimento, basta con inclinar imperceptiblemente la vasija para observar diferentes regiones, o dominios de ondas, perfectamente definidas y separadas con nitidez, que ponen de manifiesto sin ambigüedad alguna la esquiva localización de Anderson.

MANUEL TORRES,
JUAN PEDRO ADRADOS
Instituto de Física Aplicada
y FRANCISCO MONTERO
DE ESPINOSA
Instituto de Acústica, CSIC,
Madrid

Rendimiento del tabaco

Metabolismo del boro

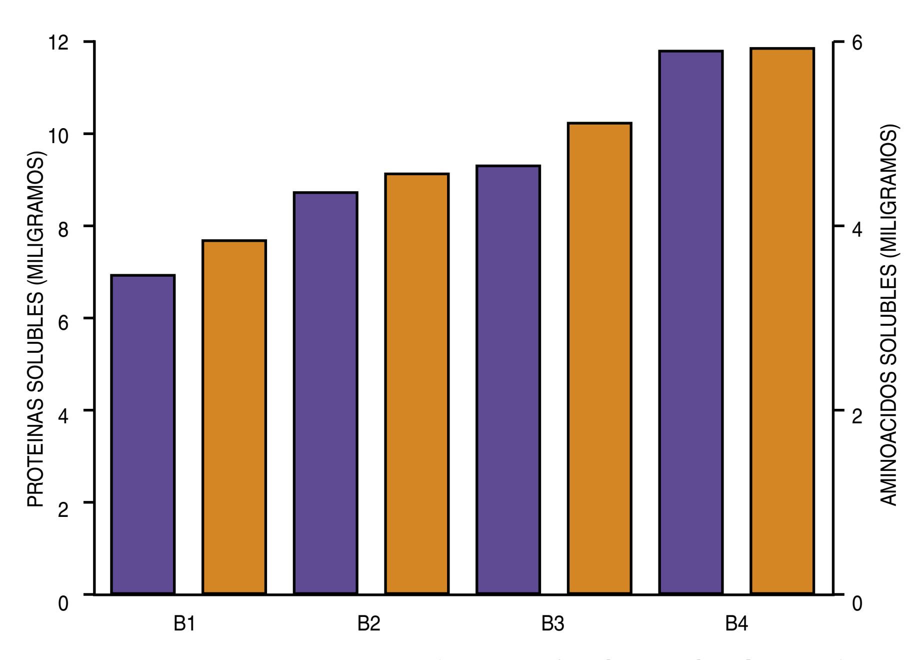
Con la aplicación de fertilizantes se obtiene un mayor rendimiento de las cosechas. Pensemos en el tabaco. La calidad de la siembra es una compleja combinación de características visuales, físicas y químicas. El abono de la planta, principalmente en forma de nitratos, incrementa la biomasa. Pero no sólo eso; en las hojas se acumulan nicotina y nitratos.

Los niveles de nitratos en las hojas ejercen un efecto destacado sobre la composición química del humo. Parte de los nitratos del humo son absorbidos por el cuerpo. Pueden entonces convertirse en nitritos y causar metahemoglobinemia. Si los nitratos reaccionan con aminas, se forman nitrosaminas cancerígenas.

Ante el riesgo que entraña el consumo de vegetales con alto contenido en nitratos, se han emprendido diversas líneas de investigación encaminadas a rebajar tales concentraciones sin reducir abono, es decir, sin menoscabo de la producción final.

La asimilación de nitratos por las plantas requiere la absorción inicial de éstos y su posterior reducción a nitritos mediante la enzima nitrato reductasa, la conversión de nitritos a amonio por acción de la enzima nitrito reductasa y, finalmente, la incorporación de amonio en compuestos nitrogenados (aminoácidos y proteínas), catalizada por las enzimas glutamina sintetasa, glutamato sintasa y fosfoenolpiruvato carboxilasa.

En la regulación de la asimilación de nitratos intervienen diversos factores y parámetros fisiológicos y medioambientales. Las plantas acumulan nitratos cuando la tasa de absorción del anión excede la cuantía de su metabolismo y asimilación. En consecuencia, la formación de nitritos, vía la enzima correspondiente, podría frenar los efectos negativos producidos por la acumulación en las hojas de este anión, en el tabaco y demás plantas que necesitan grandes cantidades de N para su crecimiento.



1. Influencia de los tratamientos de boro sobre los niveles de proteínas y aminoácidos solubles

Algunos investigadores se han centrado en el efecto ejercido por el boro sobre el metabolismo nitrogenado; más concretamente, sobre la reducción de nitratos en hojas de plantas de tabaco. El boro es un micronutriente requerido para el crecimiento normal de cianobacterias, diatomeas y plantas superiores.

Se le atribuye al boro cierto protagonismo en la síntesis y estructura de la pared celular, en la estructura y función de la membrana plasmática y en el metabolismo de los compuestos fenólicos y auxinas. Se admite su participación en el metabolismo de los hidratos de carbono y en el metabolismo del nitrógeno, ya sea en la fijación de nitrógeno atmosférico (N_2) o en la reducción de nitratos.

Abundan las pruebas del papel regulador del boro en la asimilación de nitratos. En particular, en los ensayos realizados con la especie *Nicotiana tabacum* var. Sevilla. Las plantas fueron sometidas a distintas dosis de este oligoelemento (desde 0,5 micromolar a 20 micromolar de H_3BO_3) con el fin de averiguar el efecto que ejercía sobre el contenido foliar de nitratos y la actividad de las distintas enzimas relacionadas con los procesos de reducción y asimilación.

El efecto del boro sobre el incremento de las actividades enzimáticas podía abordarse desde una triple perspectiva. En primer lugar, si ejercía una influencia directa y favorecía la actividad enzimática; en segundo lugar, si promovía la acción de las enzimas, al estimular la síntesis de las distintas proteínas enzimáticas; en tercer lugar, si el micronutriente podría influir en la entrada de nitratos en las células.

De los tres enfoques, el tercero tenía que ver con la hiperpolarización de la membrana plasmática que se había observado en condiciones deficientes o tóxicas de boro. Dicha hiperpolarización podría facilitar la entrada de grandes cantidades de nitratos, lo que causaría una inmediata estimulación del proceso de asimilación.

Ante una brusca irrupción del proceso asimilador, concurrente con una caída de boro, entrarían en las células una tromba de nitratos. La deficiencia de boro frenaría la síntesis de proteínas enzimáticas o provocaría la disminución de la actividad enzimática, con la consiguiente acumulación de nitratos en las células.

De acuerdo con nuestros resultados, el boro potencia la síntesis *de novo* de las enzimas que intervienen en la asimilación de los nitratos. La aplicación de 20 micromolar de H_3BO_3 activa el proceso de reducción de nitratos, con la disminución consiguiente de concentración de nitratos en las hojas de tabaco en un 60 % respecto a la concentración de nitratos que presentaron las plantas tratadas con 0,5 μM de H_3BO_3.

Por otro lado, la aplicación de 20 micromolar de H_3BO_3 supuso un aumento en la síntesis de compuestos nitrogenados orgánicos (aminoácidos y proteínas), que favoreció el desarrollo de las plantas. Una aplicación más asidua de boro podría comportar una menor acumulación de nitratos en las hojas de tabaco y, por tanto, una disminución de los efectos perjudiciales y tóxicos.

Otro proceso metabólico esencial para las plantas de tabaco, que viene condicionado por el boro, es el metabolismo de los fenoles. Estos compuestos naturales, muy difundidos entre las plantas superiores, intervienen en procesos fisiológicos y ecológicos. Los fenoles interaccionan con hormonas vegetales, pues se hallan implicados en las respuestas de resistencia de las plantas a enfermedades y en la decoloración de las hojas y frutos causada por la oxidación.

Aplicado a dosis deficientes o excesivas, el boro forma complejos con pectinas y fenoles en la pared celular y membrana plasmática, respectivamente. Al hacerlo, incrementa la estabilidad de estas estructuras. En contraste, cuando el boro es aplicado bajo niveles adecuados, más del 60 % de su contenido foliar permanece de forma libre.

En nuestras investigaciones observamos que la aplicación de la dosis más baja y la más elevada reflejaban condiciones de deficiencia y de saturación de boro. Las plantas tratadas con estas dosis muestran una proporción mínima del nutriente en su forma libre, siendo mayoritaria la proporción de boro ligado.

Las bajas concentraciones de su forma libre determinan un incremento de la actividad enzimática fenilalaninaamonio-liasa (PAL), principal enzima responsable de la síntesis de los fenoles. Producen también con acumulación de fenoles, que, al permanecer ligados al boro, se hurtan a la oxidación.

Las plantas tratadas con dosis intermedias de boro presentan niveles adecuados de boro libre o metabólico. Este hecho podría tener que ver con una disminución de la actividad fenilalaninaamonio-liasa. Pudiera asimismo vincularse con el incremento de la oxidación de los fenoles, por un doble motivo: debido a una mayor disponibilidad de los fenoles para ser oxidados, pues no están unidos al boro, y a un efecto del nutriente libre, aumentando la actividad de la polifenol oxidasa y la peroxidasa, principales enzimas oxidativas.

En definitiva, nuestras investigaciones indican que la aplicación de 20 micromolar de H_3BO_3 determina una síntesis y acumulación de los fenoles en las hojas de tabaco, a través de la activación de la enzima fenilalaninaamonio-liasa, e inhibición parcial de las enzimas polifenol oxidasa y peroxidasa.

La acumulación de fenoles en hojas de tabaco, derivada del incremento en la aplicación de boro, conlleva la exención de la pigmentación marrón ("browing") en las hojas y una mayor resistencia a la infección



2. *Efecto del boro sobre el crecimiento en plantas de tabaco, aplicado en menor cantidad* (a la izquierda) *y en mayor cuantía* (derecha)

por patógenos merced a la lignificación o endurecimiento de la pared celular.

Juan M. Ruiz y Luis M. Romero
Departamento de Biología Vegetal
Universidad de Granada

Embarazo y fecundidad

Entre las adolescentes españolas

En España, desde 1980, el grupo de las adolescentes —menores de veinte años— ha reducido su fecundidad. En el último quinquenio de los setenta la tasa de embarazos se había incrementado, pero a partir de los ochenta empezó a descender. La evolución es comparable a la seguida por los países industrializados, si bien con algún retraso. Los niveles que se alcanzan en los noventa son similares a los de Italia y Francia, aunque bastante más bajos que los del Reino Unido y, sobre todo, que los de Estados Unidos, país que registra la tasa de fecundidad adolescente más elevada del mundo desarrollado.

En la evolución de la tasa de fecundidad se aprecia una divergencia el curso seguido por la fecundidad de las casadas y de las no casadas. Las primeras reducen sus tasas entre 1975 y 1991, mientras que la fecundidad de las adolescentes no casadas muestra un curso divido en dos etapas: de aumento entre 1975 y 1986, y de descenso sostenido a partir de esta fecha. El cambio de tendencia coincide con la reforma del Código Penal que liberalizó el aborto, exceptuados algunos supuestos, lo que indica que una parte de los nacimientos de adolescentes solteras derivaron hacia esa vía.

Las diferencias observadas entre el curso seguido por la tasa de fecundidad y la tasa de embarazo vienen determinadas por la incidencia del aborto. La tasa de embarazo comprende los nacimientos, los abortos y las muertes fetales tardías. Por su parte, la tasa de fecundidad comprende exclusivamente los nacimientos. Dado que las muertes fetales tardías representan menos del 1 % de la tasa de embarazo, las diferencias que se observan entre la evolución de la tasa de fecundidad y la tasa de embarazo se deben a la influencia del aborto.



Proporción de abortos respecto al total de embarazos en edades comprendidas entre los 15 y 19 años en 1995

En el conjunto de España los abortos representaban en 1987 el 7,6 % de los embarazos en el grupo adolescente, mientras que en 1995 su peso había pasado al 36,64 %. La cifra del total de España no refleja la diversidad de situaciones que se producían en las regiones; en algunas de ellas, los embarazos a término fueron inferiores a los abortos.

La magnitud del descenso que entre 1990 y 1995 se había producido en la tasa de fecundidad y la tasa de embarazo entre las adolescentes difiere de una región a otra. La mayor similitud se había producido en Navarra, donde la reducción de la tasa de embarazo y la de fecundidad habían sido casi de la misma cuantía, lo que significa que el recurso al aborto no se había incrementado.

La situación opuesta se registraba en Aragón, Cataluña, Canarias y Rioja. Allí, el incremento en la proporción de abortos sobre embarazos era de más de veinte puntos porcentuales.

El embarazo no deseado alcanzaba en 1987 entre las adolescentes porcentajes en torno al 80 % de los embarazos. Esta cifra se incrementó hasta situarse en 1995 próxima al 90 %. Las comunidades autónomas con mayor proporción de embarazos no deseados sobre el total de embarazos en el grupo adolescente eran, en 1995, las de la mitad norte del país, con la excepción de Galicia.

De la observación de los datos emerge cierta tipología de comunidades autónomas que se resume en lo siguiente: se aprecia un tipo de comunidad donde la mayoría de los embarazos entre las adolescentes no son aceptados y desembocan en un aborto. Se aprecia otro grupo en el que la mayoría de los embarazos, pese a ser no deseados, finalmente se aceptan y llegan a término. Prototipo del grupo que recurre preferentemente al aborto se puede considerar a Asturias, Cataluña y Madrid, mientras que entre las que optan por tener el hijo estarían Andalucía, Castilla-La Mancha, Extremadura, Murcia y Navarra. En medio, hay una serie de situaciones intermedias, más o menos próximas a optar por el recurso del aborto.

Se ha incrementado, pues, la opción del aborto como salida ante un embarazo no deseado. Si bien las tasas de fecundidad y embarazo entre las adolescentes han descendido considerablemente en España en los años recientes, la tasa de embarazo no ha descendido en igual medida que la de fecundidad. La diferencia entre una y otra reside en el aborto.

Margarita Delgado
Instituto de Economía y Geografía,
Madrid

DE CERCA

Texto y fotos: Ana Sabatés y Josep-Maria Gili

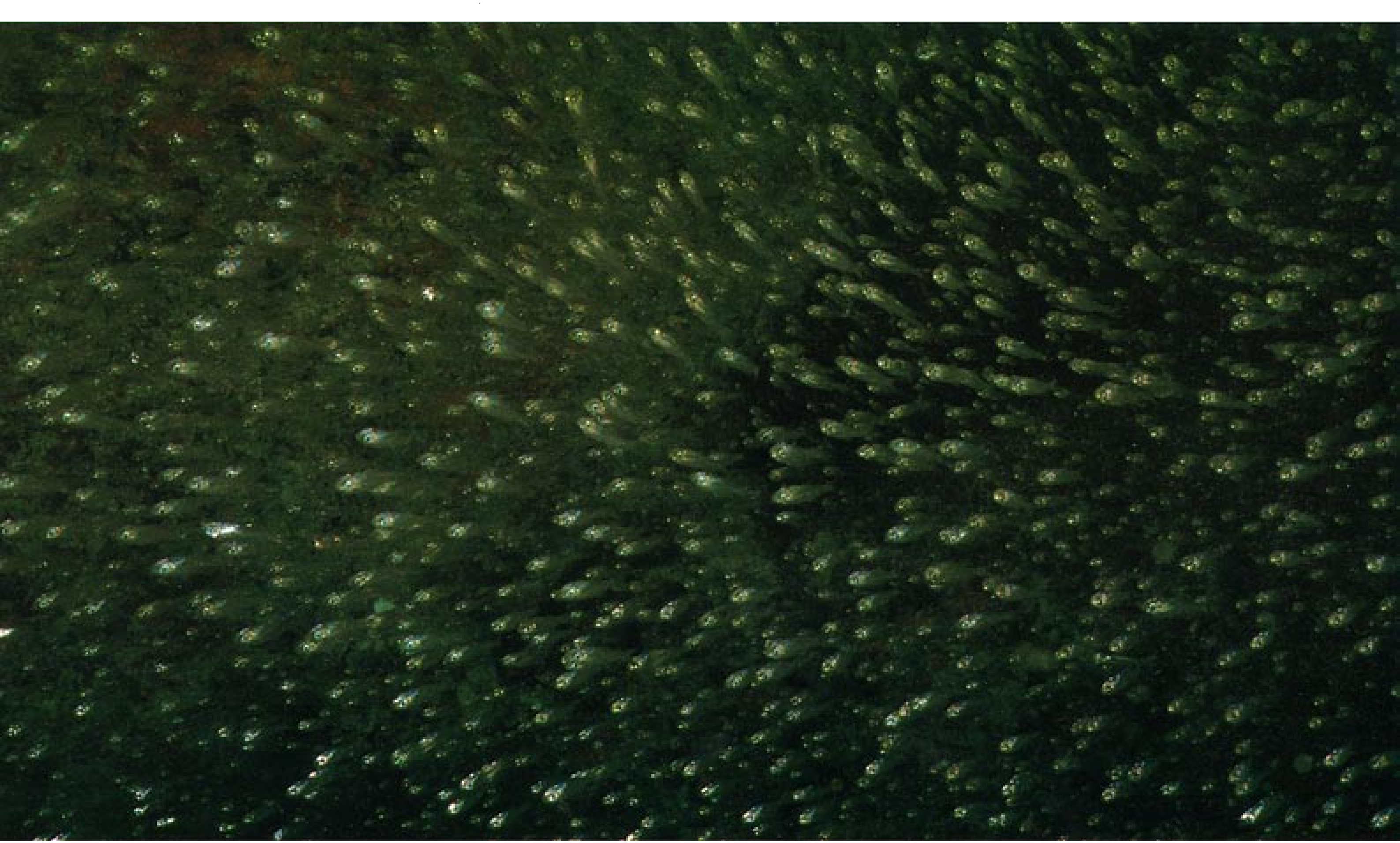
Enjambres de peces litorales

El paisaje submarino que ofrece un arrecife de coral está dominado por una riqueza exuberante de formas, estructuras y colores. Las especies que conforman el sistema del arrecife presentan pautas de distribución muy diversas. De esa variedad copiosa los peces constituyen un magnífico ejemplo. Llevan unos vida solitaria; otros se enrolan en enjambres, que son, además, de tamaños dispares con agrupaciones que van de la decena a varios centenares.

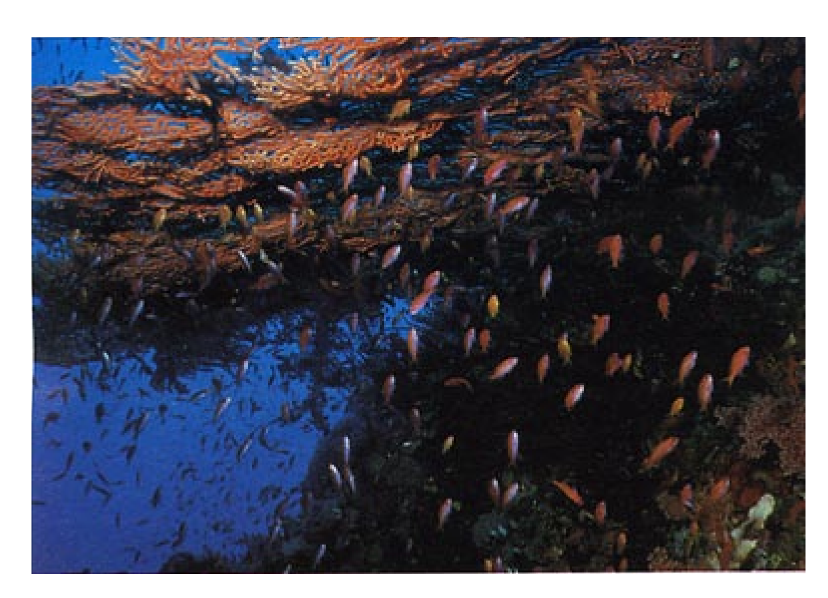
Quizás uno de los aspectos más espectaculares sean los densos enjambres de alevines, pececillos en fases juveniles que forman bancos inquietos, en continuo movimiento por los arrecifes. Resguardados de los depredadores en las cavidades del arrecife o protegidos por grandes colonias de coral o praderas de gorgonias, los enjambres son auténticas explosiones de vida.

La vida gregaria es una estrategia habitual seguida por los peces y muchos organismos pelágicos, pues les reporta evidentes ventajas ante el ataque de los depredadores o en la búsqueda de alimento. Los componentes de los enjambres se juntan o separan en acordeón, según las circunstancias. La presencia de un depredador puede instar la agrupación instantánea para resguardarse en una cueva o aconsejar la rápida dispersión para disminuir las posibilidades de captura del depredador. Un ejemplo de esta relación depredador presa es el efecto de "confusión" que sufre el depredador ante la presencia de muchísimas víctimas potenciales, tantas que no sabe por cuál decidirse. ¿No parece, además, el grupo un solo cuerpo enorme?

Los alevines se alimentan de organismos del zooplancton. La actividad de los enjambres, restringida en parte por el marcado apego al territorio de los peces coralinos, sus constantes idas y venidas, el aumento y disminución del número de componentes convierten a nuestros protagonistas en una de las expresiones más hermosas de la vida frenética que bulle en los arrecifes.



1. Enjambre de juveniles de Parapriacanthus *en una cueva submarina de un arrecife del Mar Rojo*



2. Enjambre de juveniles de Anthias *resguardándose debajo de una pradera de gorgonias a 40 metros de profundidad en el Mar Rojo*



3. Enjambre de juveniles en el momento de expansión sobre la superficie de un arrecife de las islas Seychelles



4. Pequeño grupo de adultos de Priacanthus hamur *resguardados en una cavidad del arrecife al igual que hacen los enjambres de juveniles en un arrecife del Mar Rojo*



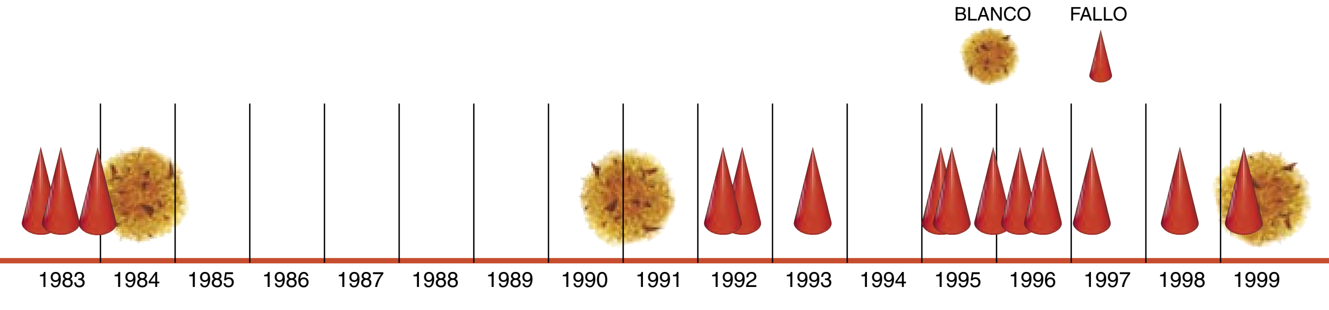
5. Banco de Mulloidichthys varicolensis *paseando por la superficie de un arrecife de las islas Seychelles*



El sistema de defensa antimisiles

Los planes actuales para defenderse contra un ataque con misiles balísticos adolecen de la misma debilidad que presentaron esfuerzos similares realizados hace 30 años

George N. Lewis, Theodore A. Postol y John Pike



2. DESDE LA PRIMERA PRUEBA en 1983, la técnica de destrucción por impacto se ha visto plagada de fallos de intercepción. A menos de un año de que los responsables decidan si el sistema de defensa antimisiles está a punto, sólo tres de las 17 pruebas de intercepción han tenido éxito.

En 1968, ante la amenaza de ataques con misiles balísticos intercontinentales, EE.UU. preparaba un sistema defensivo nacional antimisiles. En marzo de ese mismo año, Richard L. Garwin y Hans A. Bethe publicaron un artículo en *Scientific American* donde ponían de manifiesto la facilidad con que China o la Unión Soviética podrían "esquivar" el tenue escudo antimisil estadounidense a la sazón en desarrollo. Su idea de que cualquier sistema defensivo nacional resultaba ineficaz desde un punto de vista técnico fue determinante para que EE.UU. y la Unión Soviética firmaran, en 1972, el Tratado de Misiles Antibalísticos (ABM o Anti-Balistic Missile). El temor a que ese sistema provocase a la Unión Soviética e intensificara la carrera de armamentos contribuyó también a la decisión americana de firmar el Tratado, considerado un hito en el control de los armamentos. Hasta hoy, el Tratado prohíbe a EE.UU. y Rusia desplegar sistemas defensivos a escala nacional.

Al cabo de más de 30 años, EE.UU. sigue sin un sistema defensivo nacional antimisiles. La amenaza de ataques masivos con misiles por parte soviética desapareció junto con la guerra fría, pero la técnica asociada a los misiles se ha expandido y las inquietudes norteamericanas se centran ahora en la posibilidad de que un país no fiable acabe almacenando misiles de largo alcance que puedan llegar a sus fronteras. Por contra, han pasado a un segundo plano un lanzamiento ruso accidental y la pequeña, aunque potente, fuerza misilística china.

1. LOS INTERCEPTORES de destrucción por impacto son el distintivo característico del sistema de defensa antimisiles, escudo protector del territorio estadounidense contra misiles balísticos intercontinentales. El duelo entre la cabeza nuclear y el vehículo destructor maniobrable (*primer plano*), soltado desde la punta del misil interceptor, tendría lugar muy por encima de la atmósfera. El vehículo destructor se consideraría un éxito si acertara de plano sobre el blanco. Pero, aducen los críticos, bastaría con esconder la ojiva dentro de un racimo de globos cubiertos de metal u otras contramedidas para confundir a los sensores de guía del vehículo, frustrando el impacto directo buscado.

Además, ha progresado la técnica de la defensa antimisil. En vez de los interceptores de cabeza nuclear previstos en los años sesenta, se fía ahora en ordenadores más potentes y en radares y sensores más perfeccionados. Tales avances ofrecen la posibilidad de que EE.UU. emplee unos misiles de "destrucción por impacto", más aceptables por la opinión pública e ideados para destruir los objetivos por choque directo a gran velocidad.

De acuerdo con los partidarios de la defensa nacional antimisil, la combinación de amenazas con misiles y mejora de la técnica posibilita el despliegue de un escudo doméstico contra misiles. Sus esfuerzos para lograrlo están dando fruto. Tras hacerse con la jefatura del Congreso norteamericano en 1994, el partido republicano no cesó de presionar hasta lograr el compromiso de la Casa Blanca; en 1996, la administración anunció que empezaría a desarrollar un sistema que pusiera a resguardo el territorio entero de la Unión, aunque sin dar plazos.

Las amenazas

Entre los planes del Pentágono para este otoño está el de emplear los componentes clave de su defensa nacional y someter a prueba la idoneidad del sistema a la hora de interceptar fuera de la atmósfera un misil de largo alcance. En junio del 2000, tras una breve serie de pruebas adicionales, el Pentágono decidirá si las prestaciones de la técnica han superado la precisión exigida. En caso afirmativo, Estados Unidos podría contar con un sistema defensivo en el año 2003; para la administración, una fecha más verosímil sería el 2005.

Al margen del resultado del "análisis de la disponibilidad del despliegue" en el 2000, el país parece más resuelto que nunca a comprometerse en un sistema defensivo nacional para los años siguientes. En 1998, el entonces subsecretario de defensa para adquisiciones y técnica, Jacques Gansler, comunicó al Congreso que la cuestión ya no era si EE.UU. desplegaría o no una defensa nacional, sino cuándo. Desde entonces, no ha dejado de avanzarse en esa dirección. En enero de 1999, el Pentágono anunciaba la adición de 6600 millones de dólares a los futuros presupuestos de defensa para la construcción de una defensa nacional. En marzo, la Administración retiraba su oposición al proyecto de ley presentado por el Senado que dispone que el despliegue debe hacerse "en cuanto sea técnicamente viable". El proyecto fue aprobado enseguida por un amplio margen.

Pero, al igual que el sistema "Salvaguarda" (*Safeguard*) que Garwin y Bethe analizaron en 1968, la defensa estadounidense antimisiles que ahora se propone podría resquebrajarse con sencillas contramedidas ofensivas. De hecho, un sistema basado en interceptores de destrucción por impacto es más vulnerable a las contramedidas que los sistemas basados en misiles nucleares. Además, tal como se temía en 1968, es probable que el despliegue mueva a otros países a tomar medidas que debiliten la seguridad de EE.UU.

Hoy hay más países con misiles que en 1968. La mayoría de esos misiles son, sin embargo, de los llamados de "teatro", por su menor alcance, que no pueden hacer blanco en EE.UU.; además, los países poseedores de esas armas no suelen contarse entre los que nos son hostiles. Los misiles de

Los peligros inmediatos

por Daniel G. Dupont

Los debates en torno a la defensa antimisiles suelen centrarse en los sistemas nacionales, "domésticos", concebidos para proteger EE.UU. de los misiles balísticos intercontinentales. Se avanza también en la preparación de varios sistemas de "teatro" destinados a proteger tropas y bienes en otros países del ataque con misiles de alcances más reducidos, de 30 a 3000 kilómetros. La defensa de teatro suele reputarse más viable, pues se trata de proteger una zona menos extensa ante unos misiles más lentos. Pero ni siquiera los sistemas de corto alcance son invulnerables a las contramedidas que complican la defensa del territorio nacional. Y el registro norteamericano de las pruebas de sistemas defensivos de teatro muestra que abatir un misil con otro misil no es proeza fácil, ni mucho menos.

El sistema de teatro por excelencia es el Patriot del ejército. Ideado en un principio para abatir aviones, entró en combate durante la guerra del Golfo Pérsico con el propósito de anular los misiles Scud iraquíes. El sistema Patriot de primera generación (el único sistema defensivo de teatro utilizado en combate hasta la fecha) estaba destinado a destruir o desviar misiles atacantes haciendo estallar un interceptor en sus proximidades.



EN LA GUERRA DEL GOLFO (*abajo*), las cabriolas y la fragmentación inesperadas de los misiles Scud iraquíes desbarataron la acción de los misiles estadounidenses. Antes de la guerra, los Patriot (*arriba*) superaron todas las pruebas contra blancos formados por misiles balísticos, que volaban en trayectorias estables y uniformes.

El ejército declara un 60 por ciento de aciertos. Pero otros creen que el Patriot falló en todos sus enfrentamientos con los Scuds, pese a que los misiles de Hussein no emplearon contramedidas. El sistema Patriot se encuentra ahora en una fase de perfeccionamiento con un nuevo misil basado en la idea de "destrucción por impacto", igual que el sistema de defensa nacional.

Se pretende que el Sistema de Defensa de Area de Teatro a Gran Altitud (o THAAD, por Theater High Altitude Area Defense System) del ejército sea el más versátil y refinado de los esquemas de destrucción por impacto. Aunque su grado de desarrollo es inferior al del Patriot, el sistema THAAD está proyectado para interceptar los misiles balísticos de teatro del máximo alcance, dentro y fuera de la atmósfera. En su corta historia, el THAAD ha puesto de relieve, como ningún otro sistema, cuán difícil resulta lograr una defensa eficaz contra misiles. En los siete primeros ensayos de intercepción, sólo una vez hizo blanco.

De diseño similar al THAAD es el sistema de Teatro Amplio de la Armada. Se trata de desplegar barcos equipados con interceptores de misiles de largo alcance cerca de los países donde haya misiles que amenacen tropas norteamericanas o ciudades de los aliados. La marina está también trabajando en un sistema embarcado de menor alcance conocido como Defensa de Area. En una fase más provisional se halla un sistema defensivo de teatro que acompañará a las tropas en el campo de batalla.

Tras la controvertida técnica de interceptores de destrucción por impacto se encuentran las armas láser. Los planes de defensa contra misiles de la fuerza aérea incluyen el Láser Aerotransportado, instalado a bordo de un 747 y diseñado para interceptar misiles balísticos en su instante de despegue. La fuerza aérea investiga en un láser espacial que en su día podría interceptar los misiles mientras sus cohetes propulsores los impulsan hacia el espacio.

Daniel G. Dupont dirige el boletín independiente Inside the Pentagon, *en Washington D.C.*

corto alcance pueden emplearse contra las ciudades de nuestros aliados y fuerzas norteamericanas en ultramar. Se están desarrollando varios sistemas defensivos de teatro para contrarrestarlos.

Entre los misiles balísticos de teatro y los que pudieran alcanzar EE.UU. media un abismo. Los segundos son los misiles balísticos intercontinentales (o ICBM, por Intercontinental Ballistic Missile) y siempre han portado cabezas nucleares. EE.UU. teme que algún día pudieran dotarse con "armas de destrucción masiva", o sea, municiones que contengan sustancias químicas letales o agentes biológicos. El sistema defensivo nacional antimisiles de EE.UU. se prepara para interceptar los ICBM.

Rusia está en posesión del mayor número de ese tipo de misiles, pero los partidarios de una defensa nacional limitada aducen que un ataque ruso a gran escala sobre EE.UU. es altamente improbable. Por consiguiente, el sistema estadounidense se está diseñando para plantear batalla a sólo un puñado de ICBM a la vez.

La justificación invocada a propósito de la defensa nacional antimisiles es la posibilidad de un estado malvado de construir o comprar ICBM. (En la jerga del departamento de Defensa caben en esa referencia Irán, Irak o Corea del Norte.) En julio de 1998 una comisión encabezada por Donald Rumsfeld, antiguo secretario de Defensa, llegaba a la conclusión de que Corea del Norte o Irán podrían, con poco margen para nuestra reacción, desarrollar un ICBM al cabo de cinco años de decidirlo. Semejante resolución supuso un respaldo importante para la tesis de la defensa nacional antimisiles y fue un elemento decisivo para reforzar con otra partida de miles de millones de dólares el presupuesto del Pentágono para las primeras fases del despliegue. Por si había dudas, en agosto de 1998 se produjo el lanzamiento del misil norcoreano de tres etapas Taepo-dong 1, al que hubo que sumar los informes recabados sobre el desarrollo de un misil Taepo-dong 2 de mayor alcance. Si los datos se ajustan a la realidad, Corea del Norte estaría capacitada en breve plazo para apuntar el Taepo-dong 2 contra Alaska o modificarlo para lanzar pequeñas cargas útiles sobre otras partes de EE.UU.

Una justificación secundaria de la necesidad de una defensa nacional limitada es la posibilidad de un lan-

GEORGE N. LEWIS, THEODORE A. POSTOL y JOHN PIKE son analistas expertos en programas de defensa antimisiles. Lewis es director adjunto del Programa de Estudios para la Seguridad en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Postol enseña ciencia, técnica y política de seguridad también en el MIT. Pike dirige la Federación del Proyecto de Política Espacial de los Científicos Americanos, nacida en 1983 como respuesta a la Iniciativa de Defensa Estratégica del Presidente Reagan.

zamiento, accidental o no autorizado, de un misil ruso, en el que podrían intervenir sólo una o unas pocas cabezas nucleares. Ahora bien, dado el modo en que están organizadas las fuerzas nucleares rusas, un fallo en su cadena de mando haría entrar en acción a todas las cabezas nucleares de un submarino armado con misiles balísticos (hasta doscientas) o a gran parte de la fuerza rusa de ICBM. Los partidarios del sistema de defensa afirman que China, pese a no tener más de un par de docenas de ICBM, es razón suficiente para promover una defensa nacional limitada.

El proyecto

Aunque el sistema defensivo nacional antimisiles no está pergeñado en todos sus detalles, la mayoría de los componentes esenciales han echado a andar. Se conocen las líneas generales de su funcionamiento. Un ICBM disparado contra EE.UU. sería primero detectado por satélites infrarrojos de alerta precoz y luego por uno o más de los radares de alineación en fase de alerta precoz instalados en Massachusetts, California, Alaska, Gran Bretaña y Groenlandia. Esos radares funcionan a frecuencias relativamente bajas y, aunque su alcance y su resolución angular son medianos, pueden dar datos de las trayectorias de un número reducido de blancos balísticos que se muevan separados unos de otros.

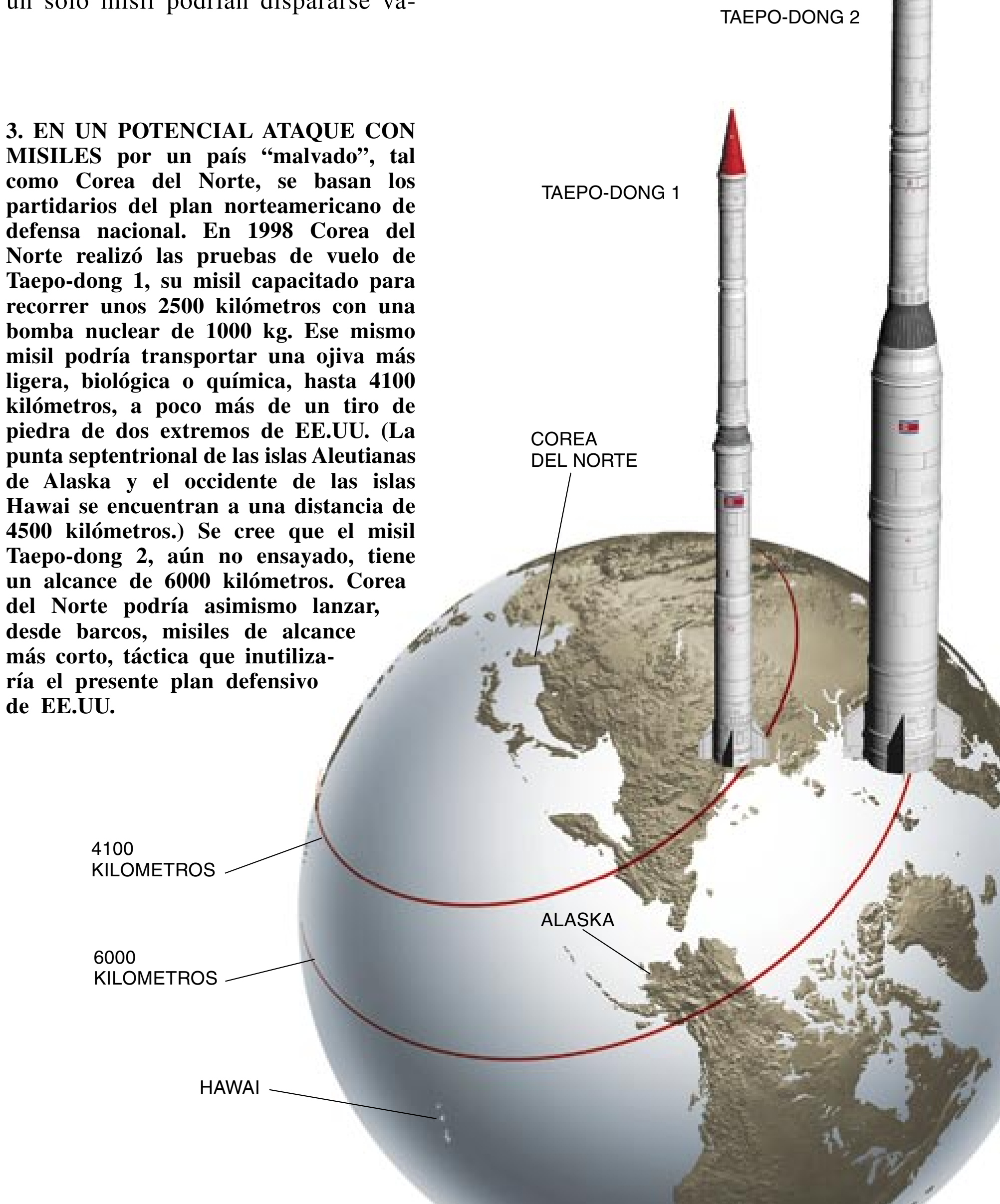
Los datos sobre la trayectoria del misil procedentes de los satélites y de los radares de alerta precoz servirían para dar el aviso al sensor primario del sistema defensivo nacional, el radar instalado en tierra; le permitirían así aumentar su campo de detección para concentrar la búsqueda del misil en un área más restringida. El radar de alineación en fase de banda X está diseñado para detectar a gran distancia misiles balísticos y seguirlos, convertidos en blancos. Opera ya un prototipo en el polígono de misiles del ejército en el atolón de Kwajalein.

Los datos del sensor y el radar se pasarían luego a un centro de gestión del combate, que determinaría los puntos de intercepción posibles y emitiría las órdenes de lanzamiento y guiado a un misil interceptor con base en tierra. Cada uno de esos interceptores se compone de un cohete propulsor y del vehículo destructor exoatmosférico, que efectúa la intercepción en el espacio tras separarse del ingenio impulsor.

Para maximizar el área defendida y la probabilidad de destrozar al misil atacante, el interceptor debe lanzarse inmediatamente tras detectarse el ataque. Rapidísimo, con una velocidad de extinción superior a los siete kilómetros por segundo, el interceptor recibiría durante el vuelo datos de actualización de guiado basados en la información procedente de distintos sensores. Para aumentar la probabilidad de destruir un blanco, contra un solo misil podrían dispararse varios interceptores. Los últimos planes elevan hasta cien los necesarios en un solo emplazamiento.

El vehículo destructor está pensado para interceptar cabezas nucleares atacantes muy por encima de la atmósfera terrestre. (El sistema no puede interceptar antes los misiles enemigos, lanzados desde muy lejos.) Empleando su propio buscador infrarrojo y los datos procedentes del radar de tierra y otros sensores, el vehículo destructor intentaría discernir entre la cabeza atacante y los restos del misil o los señuelos empleados para confundirlo. Haría uso entonces de generadores de empuje para dotarse de una gran velocidad de choque contra el misil. Idealmente, en una intercepción se destruirían por completo el vehículo destructor y su blanco.

En una defensa nacional ampliada ocuparían una situación especial los sensores nuevos o perfeccionados.



3. EN UN POTENCIAL ATAQUE CON MISILES por un país "malvado", tal como Corea del Norte, se basan los partidarios del plan norteamericano de defensa nacional. En 1998 Corea del Norte realizó las pruebas de vuelo de Taepo-dong 1, su misil capacitado para recorrer unos 2500 kilómetros con una bomba nuclear de 1000 kg. Ese mismo misil podría transportar una ojiva más ligera, biológica o química, hasta 4100 kilómetros, a poco más de un tiro de piedra de dos extremos de EE.UU. (La punta septentrional de las islas Aleutianas de Alaska y el occidente de las islas Hawai se encuentran a una distancia de 4500 kilómetros.) Se cree que el misil Taepo-dong 2, aún no ensayado, tiene un alcance de 6000 kilómetros. Corea del Norte podría asimismo lanzar, desde barcos, misiles de alcance más corto, táctica que inutilizaría el presente plan defensivo de EE.UU.

Contramedidas potenciales para anular una defensa antimisiles

Arrollar la defensa
- Construir más misiles que los que pued la defensa
- Dotar a cada misil de múltiples cabezas
- Desplegar agentes químicos o biológicc cantidad de pequeñas submuniciones

Dificultar la identificación de las cabez nucleares
- Desplegar señuelos de réplica o de trár
- Esconder la cabeza nuclear en uno de r globos revestidos de metal
- Rodear la cabeza de millares de las pe(cintas antirradar llamadas "chaff"
- Disimular la cabeza nuclear entre los fragmentos del estallido de los cohetes propulsores

Dificultar la detección de las cabezas nucleares
- Perturbar los radares
- Preceder el ataque con explosiones nucleares para cegar los detectores infrarrojos
- Envolver cada cabeza nuclear en un forro frío para hacerla invisible a los detectores infrarrojos
- Conformar las cabezas nucleares o los forros de modo que reflejen menos energía radárica
- Revestir las cabezas nucleares con materiales refringentes al radar
- Atacar los satélites de seguimiento de misiles y los radares costeros

Impedir que el interceptor impacte en la cabeza nuclear
- Esconder las cabezas tras pantallas o globos de gran tamaño
- Lanzar desde barcos misiles crucero de baja cota y misiles balísticos de alcance más corto
- Dotar de cohetes de maniobra a las cabezas nucleares



LAS CABEZAS NUCLEARES FORRADAS brindan al agresor un procedimiento para "cegar" el sistema de defensa antimisiles. Los interceptores emplean un conjunto de sensores infrarrojos para apuntar hacia las cabezas nucleares cuya temperatura es la ambiente (300 kelvin, 27 grados Celsius) y distantes centenares de kilómetros. Una ojiva revestida de nitrógeno líquido frío (77 kelvin) emitiría una señal infrarroja de una intensidad de una millonésima de la anterior, haciéndola invisible hasta que se hallara a menos de unos centenares de metros del interceptor.

Para mejorar el seguimiento de los blancos y el guiado de los interceptores, se modernizarán los actuales radares de alerta precoz. Se instalarán nuevos radares de alineación en fase de banda X, similares al radar principal de tierra, algunos de ellos junto a los radares de alerta precoz. Por último, ya está en los talleres un sistema espacial de seguimiento de misiles, conocido como SBIRS-Low (Space-Based Infrared System-Low Earth Orbit, Sistema Espacial Infrarrojo-Orbita Terrestre Baja). Este sistema de satélites, antes llamado Ojos Brillantes, está diseñado para seguir misiles y sus cabezas nucleares, desde los comienzos del vuelo, mediante sensores infrarrojos de onda corta, media y larga, así como mediante sensores de luz visible.

Según una estimación reciente de la Contaduría General del Estado, el despliegue y explotación de un sistema defensivo limitado costaría entre 18.000 y 28.000 millones de dólares. Pero es probable que los costos rebasen esas estimaciones, y los auditores del congreso también han advertido que el inventario del programa es optimista comparado con el de los sistemas de armas de mayor ambición del pasado. Además, el sistema defensivo planeado es ampliable; una vez instalado, aumentarán, a buen seguro, los interceptores o bases de lanzamiento, que reforzarán la capacidad del sistema y elevarán su costo.

La tasa de éxitos de EE.UU. en las pruebas de los sistemas de destrucción por impacto a gran altura es desalentadora, con sólo tres aciertos en 17 intentos. Ese registro ilustra las dificultades de la intercepción por impacto y revela la debilidad de la técnica. Aun cuando todas las pruebas hubieran sido positivas, no hubiera quedado garantizada la eficacia del sistema en condiciones reales. ¿Por qué? Considérese el sistema de misiles Patriot, la única arma defensiva misilística hasta ahora empleada en combate. El Patriot, un sistema defensivo de teatro, poseía un registro de pruebas perfecto antes de la Guerra del Golfo de 1991, con 17 aciertos en 17 ensayos de intercepción. Pero contrariamente a la mayoría de los informes de los medios, falló en la mayoría o en 44 de sus intentos de destruir los misiles Scud iraquíes, que se comportaban de modo distinto de los blancos de los polígonos de pruebas.

Batir al sistema

Suponiendo que se consiga que funcionen sus componentes básicos, en la práctica la efectividad del sistema defensivo nacional antimisiles dependerá ante todo de su aptitud para enfrentarse a unas circunstancias inesperadas similares y, en particular, a las medidas que el adversario tome para derrotarlo. Un modo de hacer fracasar al sistema sería lanzar ICBM suficientes para desbordarlo. Resultaría más económico y viable dedicar parte de la carga útil de cada misil a equipos de contramedidas destinados a confundir a los sistemas defensivos antimisiles.

Desde el principio, EE.UU. ha desarrollado contramedidas que pueden emplearse con sus misiles estratégicos. Cualquier país capaz de producir u obtener ICBM o armas de destrucción masiva debe ser capaz de producir o comprar contramedidas eficaces. Ello significa que, si EE.UU. despliega un sistema defensivo nacional, deberá prever que todo ICBM lanzado en su contra vendrá equipado con contramedidas.

En el espacio, donde se supone que el sistema de defensa ha de interceptar los misiles atacantes, podrían emplearse muchos tipos de contramedidas. Puesto que los cuerpos describen en el espacio trayectorias iguales independientemente de su masa, podría diseñarse un ICBM que situase junto al objeto verdadero una ojiva falsa de poca masa, de forma que el vehículo destructor norteamericano tuviera que decidir a cuál perseguir. Desde luego, una vez que señuelo y proyectil chocaran con la atmósfera, el más ligero de los dos se movería con mayor lentitud, y los sensores podrían distinguirlos, aunque demasiado tarde para la intercepción.

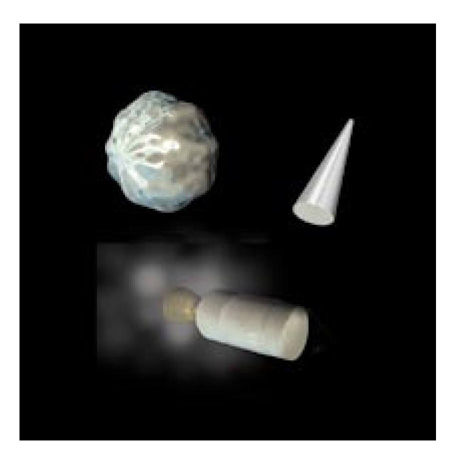
Hay tres tipos principales de contramedidas sencillas:

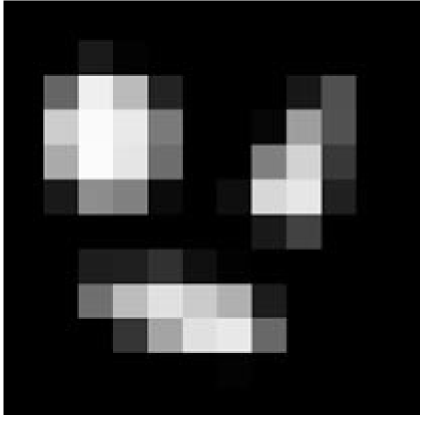
Submuniciones. Un atacante que se propusiese alcanzar EE.UU. con armas químicas o biológicas, podría cargar un ICBM con docenas e incluso cientos de pequeñas submuniciones rellenas de gases letales o agentes biológicos. Cada submunición se habría diseñado para soportar la reentrada en la atmósfera y todas combinadas desbaratarían la defensa simplemente abrumándola, ya que serían demasiados los blancos a interceptar. Además, este procedimiento es más eficaz para dispersar agentes químicos o biológicos que reunirlos en una sola carga en una ojiva.

Señuelos. Podría hacerse que un misil atacante abrumase a la defensa soltando docenas de señuelos ligeros. Los señuelos de réplica, hechos casi iguales a las ojivas auténticas, podrían dificultar, si no imposibilitar, la acción discriminadora de los radares de la defensa. Mucho más fáciles y eficaces, sin embargo, son los métodos de antisimulación, es decir, hacer que las cabezas nucleares parezcan señuelos. Por ejemplo, envolviendo en globos de mylar revestidos de metal las ojivas y lanzándolas junto con un gran número de globos vacíos. La fina capa metálica que cubriría cada globo reflejaría los haces del radar, impidiendo la detección de las cabezas, y cada globo estaría equipado con un pequeño calefactor para que los sensores infrarrojos no los discriminaran.

En vez de emplear globos iguales, el atacante podría optar por fabricarlos en tamaños y formas diferentes, equipándolos con calefactores de intensidades variables. El sistema de defensa se enfrentaría así a una tarea nada fácil: descubrir el blanco a abatir entre un montón de señuelos, ninguno de los cuales se asemejaría a una ojiva nuclear.

Forros fríos. Una ojiva de ICBM con un forro enfriado con nitrógeno líquido sería invisible para un interceptor guiado por rayos infrarrojos. Ese forro podría hacerse de aleación de aluminio y aislarse térmicamente del proyectil mediante un aislador multicapa. Un forro de 15 a 20 kilogramos requeriría una masa aproximadamente igual de refrigerante para llegar a la temperatura de licuación del nitrógeno y unos 300 gramos de refrigerante por minuto para mantener esa temperatura. La masa total del forro y el refrigerante sería de 40 a 50 kilogramos, una pequeña fracción de los 1000 kilogramos que es la masa de una cabeza nuclear de primera generación. Si se pone el debido cuidado en conformar y orientar la cabeza de modo que no refleje luz hacia el interceptor, el revestimiento en cuestión haría la cabeza invisible al sensor infrarrojo que guiase al interceptor.





4. LA LIMITADA RESOLUCION de los sensores de guía del vehículo destructor podría dificultar la selección del blanco adecuado. Una cabeza nuclear, un cohete propulsor y un señuelo caliente en forma de globo que dé vueltas en el espacio (*izquierda*) podrían parecer casi indistinguibles del vehículo destructor hasta un segundo antes del impacto (*derecha*).

Con cualquiera de estas contramedidas podría arruinarse un sistema de defensa. Pero no terminan ahí. Citemos la perturbación de los radares u otras contramedidas electrónicas, manipulación de la trayectoria de los proyectiles y empleo de chaff, o granza antirradar constituida por cuerpos de formas y características físicas absorbentes del radar, para reducir la visibilidad de los radares de la defensa. Tales contramedidas podrían emplearse por separado o combinadas.

Dada la naturaleza abierta del sistema político norteamericano y el debate sobre el mismo, cualquier adversario puede conocer las propiedades generales del sistema de defensa antimisiles. Aunque para vencer una defensa norteamericana bastaría sólo con una contramedida eficaz, esa defensa debe ser capaz de vencer a toda combinación plausible de contramedidas. Además, para que sea efectivo contra armas de destrucción masiva, el sistema debe funcionar a la primera. No parece que el sistema propuesto cumpla tales objetivos ni de lejos.

Inquietudes

Preocupaciones técnicas aparte, la instalación de un sistema antimisiles en EE.UU. tendría su eco en Rusia y China. La administración reconoce la posibilidad de añadir más emplazamientos e interceptores. Y aunque EE.UU. afirme que su sistema de defensa antimisiles busque sólo hacer frente a lanzamientos fortuitos o ataques procedentes de estados malvados, su infraestructura dispondría de las características esenciales para convertirlo en una defensa más vigorosa. Una vez desplegados el sistema SBIRS-Low y los radares de banda X de primera línea, se instalarán los sensores en los que cimentar las ampliaciones. Puesto que su desarrollo requiere mucho tiempo, los sensores constituyen una pieza determinante del establecimiento y ampliación de un sistema de defensa estratégica, razón ésta por la que los limita el Tratado ABM.

Además, en Estados Unidos se avanza en la puesta a punto de dos sistemas defensivos antimisiles de teatro, cuyos interceptores podrían poseer unas capacidades estratégicas cuando menos limitadas, si se orientan por sensores del tipo SBIRS-Low. En plazo muy corto, esos interceptores podrían enlazarse al sistema de defensa antimisiles; con ello se dispondría de 1000 o más interceptores. Muchos congresistas republicanos están haciendo campaña para modernizar el sistema de defensa de teatro embarcado en las unidades de la flota e incorporarlo al sistema general de defensa territorial. Ni que decir tiene que los estrategas rusos y chinos darían por descontada esa posibilidad.

¿Qué reacción esperar de Rusia y China ante la decisión norteamericana de establecer una defensa antimisiles? Aunque los expertos rusos conozcan la existencia de contramedidas efi-

caces, quizá lo ignoren los líderes políticos. Y la idea de que EE.UU. gaste miles de millones de dólares para instalar una defensa fácilmente neutralizable, puede que no les suene creíble a los gobernantes rusos. De hecho, el gobierno de Rusia ha manifestado su oposición al sistema territorial de defensa estadounidense y a la sugerencia de una modificación del Tratado ABM para dar cabida a ese sistema.

De seguir EE.UU. adelante con sus planes, Rusia podría negarse a negociar la reducción de sus fuerzas nucleares. Rusia ha vinculado la ejecución de los tratados de limitación de armas nucleares START I y START II al cumplimiento del Tratado ABM. Cierto es que las dificultades económicas que atraviesa ese país hacen improbable que mantenga más de 2000 cabezas nucleares operativas. Pero el despliegue de un sistema de defensa antimisiles podría complicar los esfuerzos para vaciar algo más los silos de armas nucleares estratégicas. Además, Rusia podría conservar una mayor cantidad de ojivas nucleares aprestadas para asegurarse su supervivencia tras un ataque y la consiguiente represalia. Estrategia ésta, empero, que aumentaría el riesgo de lanzamientos fortuitos contra EE.UU., una de las razones sobre las que gira la campaña a favor del sistema de defensa.

También podría resultar inquietante la reacción china ante un sistema de defensa doméstico. Hasta hoy, China se ha conformado con mantener una fuerza disuasoria muy reducida de ICBM capaces de alcanzar EE.UU., pero un sistema de defensa antimisiles, por limitado o ineficaz que sea, podría considerarlo una amenaza contra su pequeña fuerza de ICBM y verse motivada para mejorar la capacidad de sus misiles de largo alcance. Y cualquier expansión de la fuerza china de ICBM aumentaría la amenaza contra la seguridad de EE.UU.

Mientras Rusia y China mantengan relaciones con EE.UU. basadas en el marco de la disuasión nuclear, es más que probable que un sistema antimisiles constituya un óbice para avanzar en la reducción de armas nucleares. Semejante despliegue podría, además, entorpecer la cooperación ruso-americana en el empeño mutuo por rebajar los riesgos de lanzamiento accidentales: supresión del estado de alerta en misiles y retirada de las cabezas nucleares de las rampas de lanzamiento, cooperación en las alertas precoz e instalación de dispositivos de destrucción tras el lanzamiento. También dificultaría la labor norteamericana para asegurarse la cooperación rusa y china en otras cuestiones vitales, tales como la transferencia a otros países de materiales y técnica armamentísticos o el consentimiento para controlar más el material fisible ruso.

Preocupaciones relacionadas con el control de armamentos, dudas sobre la eficacia técnica e inversiones astronómicas son los factores que han complicado, a lo largo de más de treinta años, todos los intentos de desarrollar una defensa a escala doméstica. Una vez más, el problema de las contramedidas se convierte en el talón de Aquiles. Lo señalaban ya Garwin y Bethe en 1968. De un país que emplee tiempo y dinero para atacar a EE.UU. con ICBM dotados de armas de destrucción masiva no hay que esperar que se siente a contemplar el fracaso de su golpe, anulado por las defensas norteamericanas, cuando tiene a mano fáciles medidas para burlar ese sistema protector.

Por mucho que sus partidarios sigan argumentando que la posibilidad de un solo impacto es razón suficiente para exigir un sistema antimisiles, lo cierto es que un sistema con defectos técnicos de bulto de nada nos protegería. Antes bien, produciría el efecto contrario. Hemos de proponernos una defensa que preste una oposición fiable contra una amenaza real a la seguridad de EE.UU. y éste no es el caso del sistema que estamos preparando.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUTURE CHALLENGES TO BALLISTIC MISSILE DEFENSES. George N. Lewis y Theodore A. Postol en *IEEE Spectrum*, vol. 34, n.º 9, páginas 60-68; septiembre 1997.

Hay más información disponible en la Telaraña Mundial: The Ballistic Missile Defense Organization: www.acq.osd.mil/bmdo/bmdolink/ html

The Carnegie Endowment for International Peace Non-Proliferation Project: www.ceip.org/programs/npp/missiledefense.htm

The Coalition to Reduce Nuclear Dangers:clw.org/coalition/libbmd.htm

Union of Concerned Scientists: www.ucsusa.org/arms

Federation of American Scientists: www.fas.org/spp/starwars

Pescadores paleoíndios del Perú

En la Quebrada Jaguay, cercana a la costa oceánica, se han descubierto restos de actividad pesquera en los primeros momentos de la ocupación humana del Nuevo Mundo

Daniel H. Sandweiss, Asunción Cano, Bernardino Ojeda y José Roque

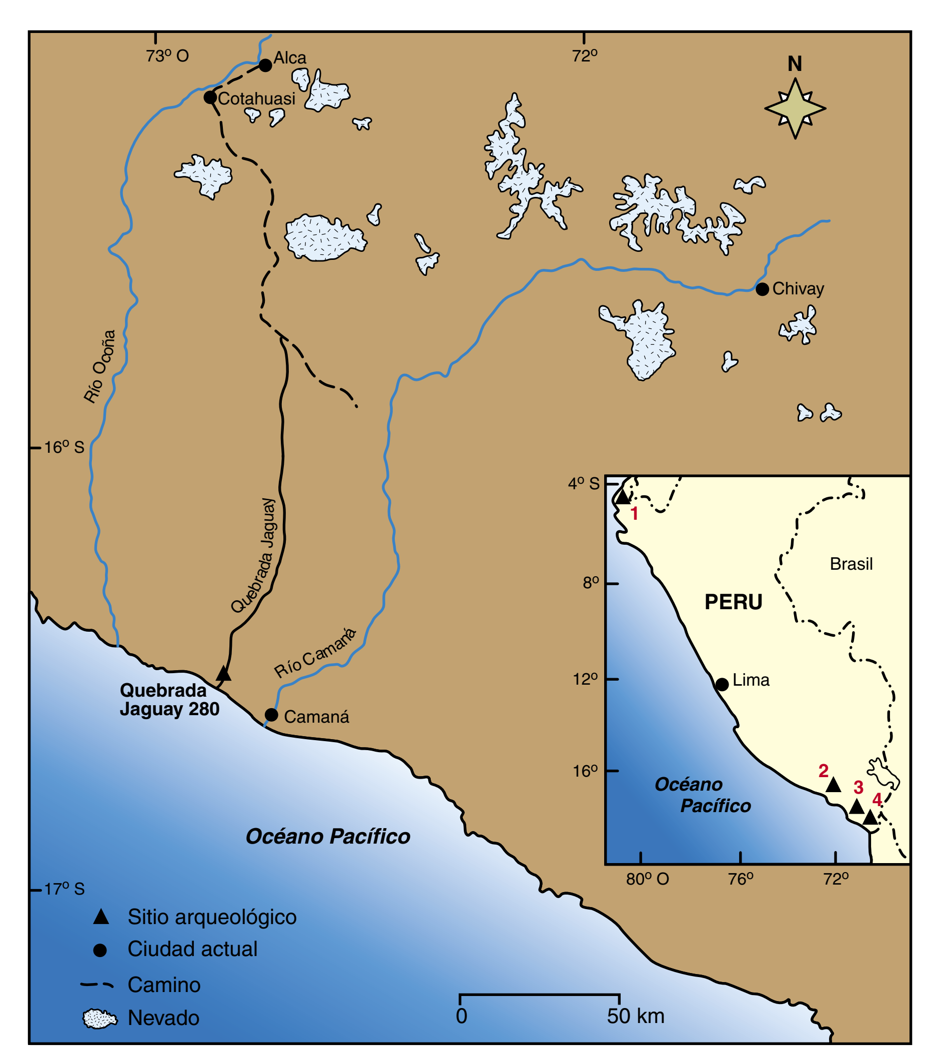
La llanura costera del Perú es, en buena medida, desértica. Aumenta su aridez conforme viajamos hacia el sur. En ese entorno inhóspito hay dos factores que permiten el desarrollo de la vida, a saber, la extraordinaria riqueza del mar y la presencia de ríos permanentes o estacionales, que bajan de los Andes.

La Quebrada Jaguay, a unos 800 kilómetros al sur de Lima por la carretera Panamericana, está formada por uno de esos cursos de agua efímeros que apenas fluyen días o semanas al año. En su lecho crecen algunas plantas; pero en su derredor no hay más que arena y roca pelada.

Hace 13.000 años los pescadores más antiguos del Nuevo Mundo instalaron aquí su campamento. ¿Quiénes eran? ¿De dónde vinieron? Desde 1996, un equipo multidisciplinario está desentrañando los secretos de aquellos pobladores y escribiendo un nuevo capítulo de la prehistoria americana.

Durante muchos años, los arqueólogos creyeron que los recursos marinos no interesaban a los primeros americanos. Por eso imaginaban que los "paleoíndios" se dedicaban a la caza mayor. Mastodontes, caballos, perezosos gigantes y otras presas terrestres aportarían las proteínas de su dieta. En línea con esa visión, los paleoamericanos no explotaron otros recursos hasta que la megafauna del continente se extinguió en las postrimerías del Pleistoceno, la llamada "Edad de Hielo", hace 11.500 años antes del presente (A.P.). Poco a poco empezaron a utilizar recursos alternativos durante el siguiente Período Arcaico (9500 a 3500 A.P.).

Esa interpretación errónea de la historia real se sustentaba, en parte, en la ausencia de yacimientos arqueológicos tempranos de zonas marginales, es decir, limítrofes con la costa o la selva, donde la megafauna era mucho más escasa que en la sierra. Todavía



1. Mapa del sur del Perú que indica la ubicación de Quebrada Jaguay y la fuente de obsidiana en Alca. En el detalle se muestra el mapa del Perú y la ubicación de sitios marítimos tempranos: Campamentos Amotape (*1*), Quebrada Jaguay (*2*), Sitio Anillo (*3*) y Quebrada Tacahuay (*4*).



2. Vista tierra adentro de la Quebrada Jaguay desde el sitio QJ-280. A la izquierda, nótense las conchas y el pozo excavado por Engel en 1970.

en los años setenta, los yacimientos peruanos de pescadores costeños hasta entonces descubiertos no se remontaban más allá de los 5800 años A.P. En 1981, James B. Richardson III, de la Universidad de Pittsburgh, observó que la fecha de 5800 A.P. coincidía con el momento en que el nivel global del mar se estabilizó cerca de su posición actual.

En diversos momentos del pasado, los glaciares continentales cubrieron extensas áreas de la Tierra, almacenando suficiente agua hasta bajar el nivel del mar unos 135 metros por debajo de su cota actual. Los zócalos continentales quedaron expuestos. Desde los 20.000 hasta los 5800 A.P., el nivel del mar subió gracias al retroceso de los glaciares, inundando grandes extensiones de las costas del mundo.

Richardson sugirió que los primeros habitantes de las Américas incluían a pescadores, aunque los testimonios de su habitación estaban hundidos bajo el mar en los zócalos continentales. Sin embargo, señaló, allí donde los zócalos son muy estrechos, el cambio del nivel del mar no significó la pérdida de grandes extensiones laterales de tierra y podría haber yacimientos de pescadores antiguos por encima de la playa actual.

Hasta la década de los noventa, el único apoyo de la tesis de Richardson eran las dataciones por radiocarbono de conchas marinas encontradas en dos yacimientos arqueológicos, uno en el extremo norte y el otro en el extremo sur del país, ambos en zonas donde se angostaba el zócalo continental. En los dos casos, las dataciones correspondían a la época Paleoíndia, anterior a los 11.000 años A.P. Pero los moluscos marinos no son el material idóneo para fechar. Muchos arqueólogos dudaron en aceptar los resultados y considerarlos prueba fehaciente de la existencia de pescadores paleoíndios.

En 1970, Frédéric Engel había descubierto un yacimiento en la costa sur del Perú, una zona de zócalo estrecho. Lo denominó Quebrada Jaguay 280 (QJ-280), por ubicarse en el margen derecho de ese paso. De sus sondeos extrajo una muestra de carbón vegetal que, al radiocarbono, se fechó en unos 11.600 años A.P. Aunque publicada la datación en 1981, nadie reparó en la misma hasta diez años después, cuando Bernardino Ojeda, miembro del equipo de Engel, se lo mencionó a Daniel Sandweiss. Al año siguiente, Ojeda llevó a Sandweiss hasta el yacimiento. Allí comprobaron que éste contenía testimonios del uso de recursos marinos. La datación temprana y la corroboración de indicios de actividad pesquera nos movieron a armar el Proyecto Arqueológico Quebrada Jaguay en 1996. El proyecto sigue vigente y ha contado con el apoyo económico de la Corporación Timex, la Fundación Heinz, la Fundación Brennan & Brennan, la Universidad de Maine y del doctor Thor Heyerdahl. El Instituto Nacional de Cultura del Perú ha autorizado y supervisado todas las investigaciones del proyecto.

El proyecto abarca varias campañas de excavación del yacimiento QJ-280, iniciadas en 1996, el análisis de los restos recuperados y un catastro de la zona local, para ubicar otros yacimientos.

La Quebrada Jaguay, integrada en el desierto costero, presenta un clima extremadamente árido, con un promedio inferior a los 12 milímetros de

DANIEL H. SANDWEISS es profesor asociado de Antropología y Estudios del Cuaternario en la Universidad de Maine. Lleva más de 20 años investigando la prehistoria del Perú, sobre todo las adaptaciones marítimas y la relación entre la cultura y el ambiente a través del tiempo. ASUNCION CANO es profesor principal de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. Experto en botánica, realiza sus estudios en taxonomía y florística de plantas vasculares de la costa y Andes peruanos y en restos vegetales arqueológicos. BERNARDINO OJEDA es arqueólogo, con más de 30 años de experiencia, sobre todo en el precerámico de la costa peruana. JOSE ROQUE, biólogo de formación, centra su interés en trabajos florísticos y en estudios de restos vegetales arqueológicos.

precipitación anual. Las temperaturas medias mensuales están alrededor de 20 ºC, con máximas extremas alrededor de 28 ºC y mínimas extremas cercanas a 7 ºC.

A unos 40 metros de altitud y a dos kilómetros de la costa actual, se encuentra el yacimiento Quebrada Jaguay 280. Está en una llanura (pampa eriaza) con vegetación confinada al cauce de la quebrada. Más al este y por encima de los 200 metros se levantan las lomas de Camaná. Cuentan los lugareños que el agua corre por la quebrada unos días o semanas del verano austral, no más.

La vegetación de la quebrada presenta elementos florísticos típicos de un monte ribereño, con plantas leñosas dispersas y de porte pequeño. Las hierbas crecen rápidamente cuando hay disponibilidad de agua superficial.

Entre los árboles y arbustos destacan el huarango (*Acacia macracantha*), algarrobo (*Prosopis* sp.), molle (*Schinus molle*), cahuato (*Tecoma arequipensis*), toñuz (*Pluchea chingoyo*), pájaro bobo (*Tessaria integrifolia*) y el carricillo (*Phragmites australis*).

Entre la vegetación herbácea se puede encontrar algunos elementos florísticos de las lomas costeras, tales como *Palaua* sp., *Nolana* spp., *Suaeda foliosa* var. *tenuis* y *Atriplex* spp., especies de vegetación ribereña, como *Tiquilia* spp., y malezas o invasoras de cultivos (*Amaranthus* sp., *Chenopodium ambrosioides*, *C. murale*, *Medicago polymorpha*, *Cenchrus* sp., entre otras). No faltan elementos xerofíticos suculentos; por ejemplo, varias cactáceas: *Neoraimondia arequipensis*, *Haageocereus* sp. y *Melocactus peruvianus*.

De entrada, en 1996, parcelamos la Quebrada Jaguay 280 en cuatro sectores de distintos tamaños. En 1996, abrimos pozos de excavación en 13,5 metros cuadrados: 7 m^2 en el sector I, 4,5 m^2 en sector II y 1 m^2 en cada uno de los sectores III y IV. El equipo de campo estuvo formado por los peruanos Rolando Paredes, María del Carmen Sandweiss y Osvaldo Chozo; los estadounidenses Daniel Sandweiss (director del proyecto) y Heather McInnis, y el canadiense Trevor Ott. Más tarde se incorporaron los peruanos Bernardino Ojeda, para hacer el plan detallado del yacimiento y participar en el catastro, y José Roque, para estudiar la flora actual de la zona.

La estratigrafía más compleja se reveló en el sector I. Distinguimos aquí tres momentos ocupacionales, por lo menos. En la base, a una profundidad de hasta 50 cm, el primer nivel de ocupación se fecha entre los 10.500 y 13.000 años A.P. aproximadamente. En ese horizonte, sin indicios de arquitectura, aparecen ya lascas de piedra, huesos de pescados y conchas marinas.

En un segundo estrato de ocupación, sobre el anterior, descubrimos parte de una casa semisubterránea, de forma circular con 5 m de diámetro, piso de barro y un fogón en el medio. Aunque no aparecieron signos inequívocos de techumbre, había en el borde del habitáculo lodo amontonado con improntas de piedras, que tal vez sirvieron para sostener las vigas de un techo tipo toldo. Constaba el suelo de la estancia de finas capas amasadas con ceniza, carbón y conchas trituradas, huesos de pescado, restos botánicos, lascas y una raedera de piedra. Esas capas superpuestas debieron de ser residuos depositados y pisados durante el uso de la casa, que se fecha entre aproximadamente 8400 y 8750 años A.P.

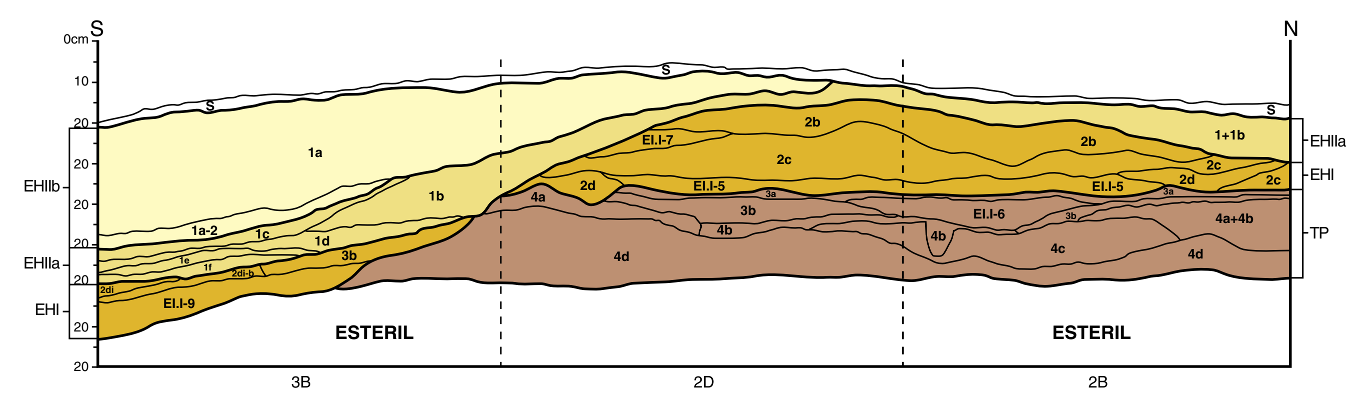
Finalmente, la casa está tapada



3. Parte de la casa semisubterránea con más de 8000 años de antigüedad en el Sector I del sitio QJ-280. Nótese la mancha negra del antiguo fogón.



4. Hoyos de poste con 13.000 años de antigüedad en el Sector II del sitio QJ-280.



5. Corte estratigráfico del Sector I, Quebrada Jaguay 280, perfil oeste, que muestra los niveles asociados con los diferentes componentes. Pleistoceno Final (TP); Holoceno temprano (EH), que se divide en tres momentos: EHI, EHIIa y EHIIb. EHIIa corresponde a la casa semisubterránea y EHIIb al basurero que rellena la casa después de su abandono.



6. Restos de conchas en el sitio QJ-280.

con un grueso nivel de conchas enteras y huesos de pescados. Por la buena condición (no pisadas) de las conchas, este tercer nivel representa el abandono de la casa y el uso de la hondonada como un basurero, alrededor de 8250 años A.P.

En el sector II podemos apreciar una serie formada por muchos estratos. Todos delgados, parecidos y fechados dentro de un lapso bastante breve, hace entre 11.000 y 12.600 años. El sector II contenía restos de conchas, huesos de pescado, pocos restos botánicos, lascas y algunos instrumentos bifaciales de piedra. En la base de la cuadrícula excavada, a una profundidad de 25 cm, descubrimos una serie de hoyos, donde, muy posiblemente, se habían clavado palos para soporte estructural.

Se procedió al análisis del radiocarbono para determinar la fecha de los desperdicios recuperados. Hasta ahora hemos examinado los restos de animales (conchas y huesos), de plantas y de obsidiana (una piedra volcánica). El análisis de los demás instrumentos de piedra está en proceso.

María del Carmen y Daniel Sandweiss estudiaron los moluscos. En QJ-280, el 99,5 % de las conchas marinas provienen de una sola especie, la almeja *Mesodesma donacium*, la popular "macha" peruana. La condición de las conchas (enteras o trituradas) nos da una idea de la naturaleza del estrato en que se ha encontrado, si basurero o estancia. Uwe Brand, de la Universidad Brock en Canadá, ha comenzado el estudio de la composición química de los moluscos con el fin de averiguar la estación del año en que fueron utilizados; aún no hay resultados fijos, pero los primeros indicios son alentadores.

Los demás restos de animales fueron estudiados por Heather McInnis, quien descubrió que la mayoría de los huesos identificables pertenecían a peces de la familia Sciaenidae, hoy considerados entre los pescados más finos del Perú para el consumo humano. El tamaño estándar promedio de los peces era de unos 17 centímetros, lo que induce a pensar que, muy probablemente, fueron capturados con redes. También hallamos restos de cangrejos y camarones de agua dulce (famosos hoy en el cercano río Camaná).

No existen grandes variaciones en la presencia de los elementos de fauna en los diferentes niveles excavados, lo que sugiere que la tradición alimentaria de los habitantes del sitio apenas cambió durante los casi 5000 años en que fue visitado por los antiguos pescadores del sur peruano.

De los restos vegetales procedentes de QJ-280, se ha podido identificar con toda certeza el mate (*Lagenaria siceraria*) y la cola de caballo (*Equisetum* sp.); con cierta reserva, debido a las condiciones de los restos, el algodón (*Gossypium* sp.) y la guayaba (*Psidium* sp.). Se trataba, en su mayoría, de fragmentos de tallos, algunos total o parcialmente carbonizados. *Lagenaria siceraria* está representada en los

restos por fragmentos de los frutos ("mate"), que fueron y siguen siendo empleados como recipientes de uso diverso. El cultivo de esta planta arranca desde hace mucho tiempo. En la flora peruana hay dos especies del pteridófito mencionado *Equisetum, E. bogotense* y *E. giganteum*, que medran en la humedad de las riberas de ríos y canales de riego. Por sus propiedades diuréticas y antiinflamatorias se utilizan en medicina. Y sus cenizas pulieron antaño objetos de plata.

Con excepción de la posible guayaba, todos los restos de flora identificados hasta el taxón de género provienen de los niveles más recientes del sector I. Los fragmentos de mate y de cola de caballo aparecieron en los estratos que interpretamos como los desperdicios de los habitantes de la casa semisubterránea; el presumible algodón se recogió del basural que sella la ocupación. La guayaba se ubicó en el sector III, cuya datación histórica no está determinada. De los niveles más antiguos del yacimiento, lo mismo del sector I que del II, sólo tenemos restos carbonizados y no carbonizados de tallos.

El vidrio volcánico conocido como obsidiana puede obtenerse solamente de unas pocas fuentes en la región andina. Aquí, igual que en otras partes del mundo, la obsidiana fue muy apreciada por sus cualidades de fractura y la posibilidad de sacar fácilmente un borde muy filudo. Los pequeños y escasos restos de este material provenientes de QJ-280 fueron analizados por Richard Burger, de la Universidad de Yale, y Michael Glascock, de la Universidad de Missouri. Al comparar la composición química de la obsidiana de QJ-280 con las procedentes de fuentes andinas, se comprobó que todos los fragmentos provinieron de Alca. Esta localidad se encuentra en la sierra sur del Perú, a 2850 metros sobre el nivel del mar. De QJ-280 se puede llegar hasta Alca subiendo por la misma quebrada hacia la sierra, luego cruzando hacia el valle de Cotahuasi por una serie de abras y continuando río arriba; la distancia total es de aproximadamente 130 kilómetros.

La mayoría de los fragmentos de obsidiana se hallaron en los niveles más antiguos, de la fase Jaguay. La ausencia de obsidiana en las fases posteriores sugiere algún cambio en la relación de los habitantes del asentamiento con la sierra de donde proviene esa piedra volcánica.



7. Detalle de machas (*Mesodesma donacium*) del Sector I en Quebrada Jaguay 280.

Para entender mejor el contexto regional del yacimiento Quebrada Jaguay 280, y considerando que anteriormente se había ubicado y fechado sólo un asentamiento más en las cercanías de QJ-280, decidimos hacer un catastro de yacimientos de la zona comprendida entre la Quebrada La Chira (unos 10 kilómetros al oeste-noroeste de la Quebrada Jaguay) y el río Camaná (unos 15 kilómetros al este-sureste de la quebrada). La zona de estudio se extendió tierra adentro hasta los 700 metros sobre el nivel del mar, o alrededor de 5 kilómetros desde la playa. El equipo para el catastro lo integraron D. Sandweiss, B. Ojeda y R. Paredes.

A cada asentamiento hallado le asignamos un número, describimos su estado, tomamos fotos, recolectamos algunos artefactos típicos de la superficie y lo ubicamos en los mapas disponibles mediante técnicas geográficas tradicionales y mediante un receptor de sistema de posicionamiento global (GPS). Posteriormente, excavamos uno o más sondeos pequeños para tener una idea de la profundidad y naturaleza de los restos

La costa peruana

La costa peruana, una faja relativamente angosta de unos 2500 metros, se extiende desde los 3º 23' hasta los 18º de latitud Sur. El clima depende de la interacción entre la Corriente Peruana o de Humboldt y la Corriente El Niño, la primera de aguas frías y la segunda de aguas cálidas. En su mayor extensión (5º-18º S) la costa es un desierto que se prolonga hasta los 30º S en Chile; esta área se caracteriza por un clima muy árido debido a un régimen dominado por una inversión térmica generada por la fría corriente marina. La precipitación, restringida a los meses entre mayo-junio y octubre-noviembre, se produce en forma de finas gotas, o "garúas".

Condiciones climáticas tan duras de la costa han permitido el desarrollo de una vegetación muy particular. Propios del norte son el manglar, chaparral, ceibal, monte perennifolio y algarrobal. Al sur ocurren lomas, tilansiales, gramadales, humedales costeros y el monte ribereño, que se desarrolla a lo largo de los ríos costeros. Las lomas son formaciones endémicas de las costas peruana y chilena, entre los grados 8 y 30 de latitud Sur. Es una vegetación predominantemente herbácea, que crece en los cerros cercanos al mar por la condensación de las nieblas invernales (mayo-octubre) y la garúa. El monte ribereño, perenne, se desarrolla en las orillas de los ríos que bajan hacia el océano Pacífico; está caracterizado por la presencia de plantas leñosas, entre las que se puede mencionar a *Tessaria integrifolia*, *Baccharis* spp., *Phragmites australis*, *Gynerium sagittatum* y *Tecoma arequipensis* (en los valles del sur). La vegetación del monte ribereño constituye y ha constituido fuente importante de recursos para los pobladores de la costa.

y para extraer material orgánico del nivel inferior, con la intención de datar por radiocarbono el momento en que se empezó a habitar el lugar.

Descubrimos un total de 55 puntos de instalación humana. De ellos fechamos 17. Los datos obtenidos permiten elaborar un esbozo de la secuencia ocupacional de la época precerámica en la región de Quebrada Jaguay. Para sorpresa nuestra, el único sitio cuya datación se remonta a una fecha anterior a los 11.000 años A.P. es QJ-280. Denominamos a esta primera ocupación la fase Jaguay. Luego viene una serie de asentamientos fechados entre aproximadamente los 10.500 y los 8000 años A.P., que denominamos la fase Machas. Estos yacimientos quedan dentro de la misma Quebrada Jaguay (incluidas las ocupaciones más tardías de QJ-280) o en los cerros bajos al este y al oeste de la quebrada, generalmente por debajo de los 300 metros. Contienen restos de conchas, casi todas de macha (*Mesodesma donacium*), a menudo huesos de pescados e instrumentos bifaces. No hemos observado piedras de moler.



8. Machas frescas tendidas en una red para secar la carne y conservarla. Es probable que los antiguos habitantes de Quebrada Jaguay hicieran lo mismo.

La época precerámica termina con la fase Manos. Los yacimientos de este período se concentran en las colinas, por encima de los 200 metros, dentro de la actual zona de la vegetación de lomas. En los sitios Manos abundan diversidad de moluscos; la piedra lasqueada es rara, pero menudean los instrumentos de piedra para moler, como son manos y batanes. Por lo general, estos instrumentos de moler están hechos de un basalto oscuro, de textura porosa; son frecuentes manos de forma ovalada y plana hechas de este material. Aunque sólo pudimos datar uno de esos enclaves, habitado alrededor de 3600 años A.P., por las características tan uniformes sospechamos que todos son de una antigüedad parecida.

Los descubrimientos obtenidos en el yacimiento QJ-280 y alrededores resuelven un interrogante, al par que abren otros muchos. No hay duda de la actividad pesquera de los paleoíndios de América del Sur. Un equipo encabezado por el geólogo David Keefer ha descubierto otro enclave de pescadores a unos 200 kilómetros al sur de la Quebrada Jaguay, en la Quebrada Tacahuay. Ahora que sabemos dónde buscar (en lugares con zócalo continental estrecho) y cómo hacerlo (datando por radiocarbono los niveles inferiores de los habitáculos), es de esperar que este inventario provisional aumente muy pronto.

Se ha descubierto también que por la misma época se explotaban otros recursos, como son los animales y plantas de la selva amazónica, según las investigaciones de la arqueóloga Anna Roosevelt. Se ha difuminado, hasta borrarse, la imagen del paleoíndio como un cazador obsesionado con los mamíferos grandes.

Pero, ¿quiénes eran aquellos pescadores? ¿De dónde vinieron? ¿Quién les enseñó el oficio? Hace unos 20 años se avanzó la hipótesis según la cual los primeros americanos fueron emigrando por la costa oeste del continente, frente a la opinión imperante que abogaba por un descenso desde Alaska por caminos del interior. Sin embargo, no había pruebas con que respaldar la hipótesis y se hablaba de que tal vez persistieran bajo el mar, en el zócalo hundido. Cuando salieron las primeras noticias de Quebrada Jaguay y Quebrada Tacahuay, muchos vieron a estos sitios como la prueba esperada de una primera migración costeña o, por lo menos, una migración por las costas, paralela y simultánea con la del interior. ¿Fue realmente así?

Si bien la antigüedad de las adaptaciones marítimas indicada por Quebrada Jaguay afianzan la plausibilidad de una migración costeña, no se excluyen otras interpretaciones. Sopesando la información recabada de QJ-280 y los demás yacimientos precerámicos cercanos, parece que los primeros habitantes del lugar tuvieron una estrecha relación con la sierra adyacente y, posiblemente, pasaron parte del año allí. La obsidiana muestra el contacto con la zona andina.

El hecho de que QJ-280 (el único enclave cuya datación se remonta a una fecha anterior a los 13.000 A.P.) se halle en la ribera de una quebrada que da acceso directo a la sierra, unido a la naturaleza efímera de las posibles construcciones de postes y la breve estación en que llega el agua, sugiere que los paleoíndios de la fase Jaguay pasaron gran parte del año en otros lugares; por ejemplo, en el valle serrano de Cotahuasi, donde se ubica Alca.

Durante la fase Machas el nexo con la sierra, indicado por la obsidiana, se ha roto al parecer. Las construcciones revelan una necesidad de permanencia más prolongada y se multiplican los enclaves de habitación, lo mismo en la Quebrada Jaguay que en las cercanas lomas y quebradas menores. Todo ello nos habla de un importante cambio en la vida de los habitantes.

En la fase Machas, pensamos que la gente vivía el año entero en la vecindad de la costa, de acuerdo con un sistema de rotación en razón del cual pasaban los meses de verano en enclaves donde había agua y víveres, para trasladarse en invierno a las lomas, donde disponían de recursos vegetales, animales y, probablemente, agua debido a las garúas y la condensación de la neblina. Por su tamaño, QJ-280 sigue siendo el sitio más importante.

Las dataciones más tardías de la fase Machas sitúan su fin en torno

al 8000 A.P. La siguiente fase Manos empezó alrededor de 4000 A.P. No sabemos si el lapso entre las dos fases se debe a los pocos datos disponibles o si realmente representa el abandono de la zona. Pero ese intervalo coincide, casi exactamente, con la época de clima más cálido de los últimos cien mil años. Tal vez, los recursos hídricos disminuyeron demasiado para permitir la vida humana cerca de Quebrada Jaguay.

Lo que sí queda claro es que la fase Manos representa una forma de vida que difiere de las fases anteriores. Abandonado el antiguo campamento base de QJ-280, ahora se asientan de preferencia por encima de los 200 metros, en las lomas. Descubrimos elementos para moler la comida y una mayor variedad de moluscos. No existe ningún enclave de mayor extensión. En la fase Manos, es posible que la gente pastoreara sus llamas (domesticadas en esa época) durante el invierno en las lomas, aprovechando de paso los cercanos recursos marinos. En el verano, se supone, volvieron a la sierra o al valle de Camaná.

El yacimiento Quebrada Jaguay se ha convertido en pieza clave para entender el ayer del Nuevo Mundo. Es de esperar que muy pronto otros hallazgos nos indiquen por dónde llegaron los paleoíndios y nos permitan ahondar en su forma de vida.

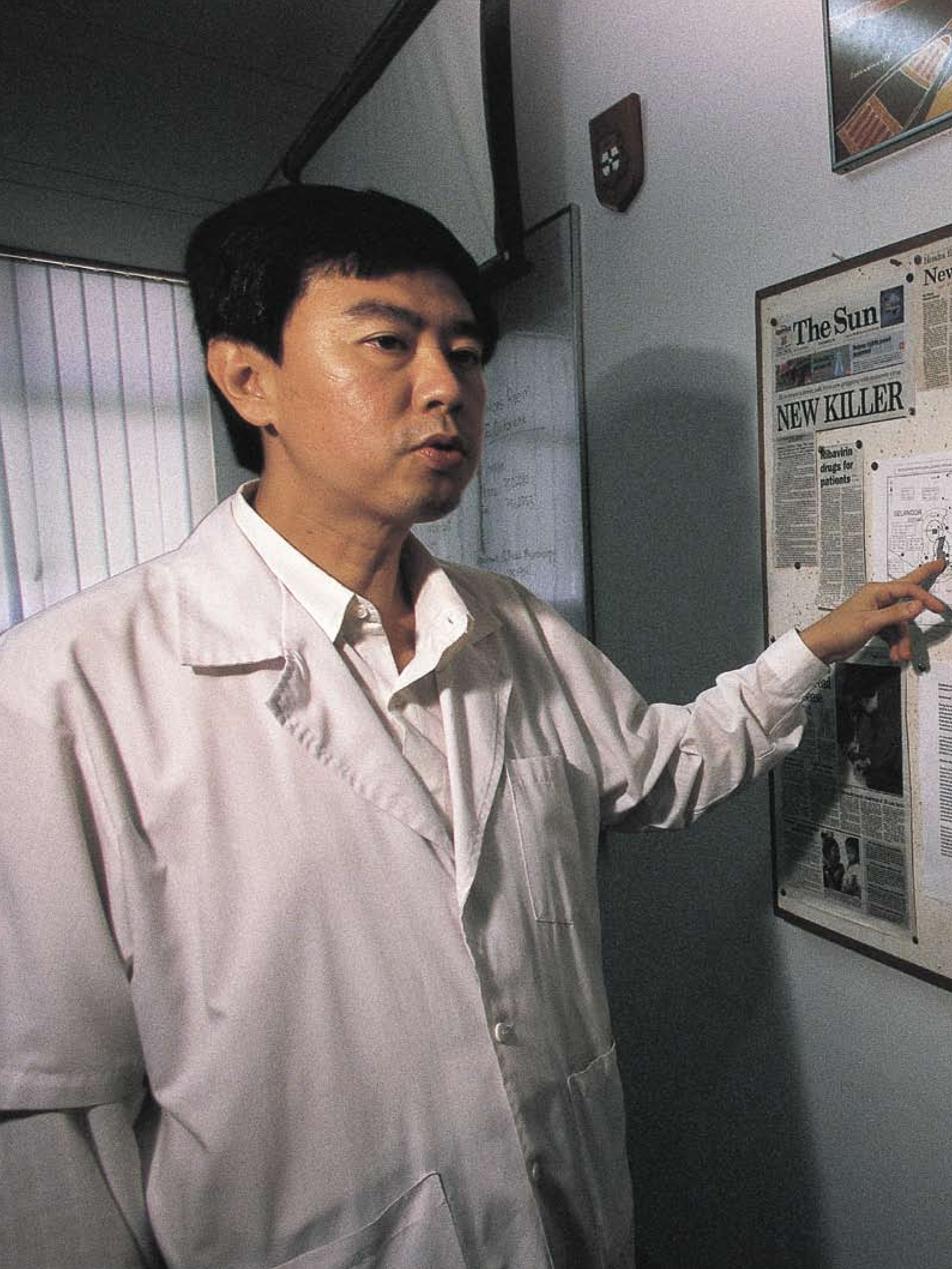
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FITOGEOGRAFÍA Y CONSERVACIÓN DE LA COSTA CENTRAL DEL PERÚ. B. León, K. R. Young y A. Cano, en *Estudios sobre diversidad y ecología de plantas. Memorias del II Congreso Ecuatoriano de Botánica*, dirigido por R. Valencia y H. Balslev; 1997.

QUEBRADA JAGUAY: EARLY SOUTH AMERICAN MARITIME ADAPTATIONS. D. H. Sandweiss, H. McInnis, R. L. Burger, A. Cano, B. Ojeda, R. Paredes, M. del C. Sandweiss y M. D. Glascock, en *Science*, vol. 281, págs. 1830-1832; 1998.

EARLY MARITIME ECONOMY AND EL NIÑO EVENTS AT QUEBRADA TACAHUAY, PERU. D. K. Keefer, S. D. De France, M. E. Moseley, J. B. Richardson III, D. R. Satterlee y A. D. Day-Lewis, en *Science*, vol. 281, págs. 1833-1835; 1998.

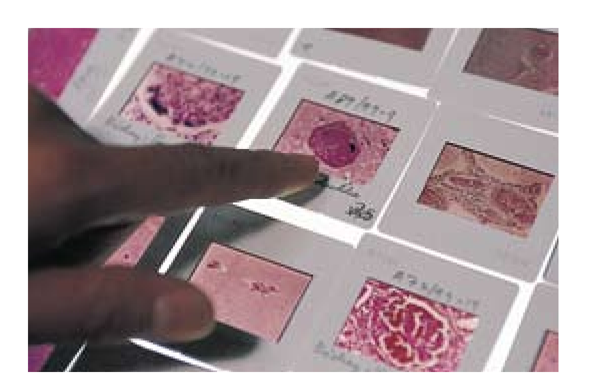
FIRST AMERICANS AND THE SEA. D. H. Sandweiss, D. K. Keefer y J. B. Richardson III en *Discovering Archaeology*, vol. 1, n.º 1, págs. 59-65; 1999.


The Sun
NEW KILLER
Ribavirin drugs for patients

Tras la pista de un virus nuevo

Un virus sin identificar que asoló el campo malayo, mató a más de 110 personas y obligó a sacrificar un millón de cerdos, ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad del mundo ante nuevas enfermedades. Para doblegarlas no bastan ni siquiera los mayores esfuerzos de los mejores expertos

W. Wayt Gibbs
Fotos de Chris Brown *SABA*



Chua Kaw Bing aguantó como pudo las 18 horas de avión desde Kuala Lumpur hasta Los Angeles. Odia los vuelos largos. Pero no para desde que abandonó el ejercicio privado de la medicina para estudiar los brotes de epidemias víricas con Lam Sai Kit, experto mundial en la materia que dirige el departamento de microbiología de la Universidad de Malasia.

Lam, consciente de que en la lucha contra las enfermedades emergentes no cabe la acción individual, sino que se impone la colaboración internacional, envió a Chua a Perth para obtener ayuda australiana. Ocurría eso en febrero. Había que determinar el agente del brote epidémico desencadenado en Port Klang, que había producido dolorosas hinchazones en las articulaciones de 27 personas.

1. Chua Kaw Bing (*izquierda*) señala el nuevo virus que se alimenta a través de las paredes de los vasos sanguíneos (*arriba*).



2. Los neurólogos (*derecha*) hacen frente a la nueva forma de encefalitis, conscientes del gravísimo mal que causa a los pacientes (*arriba*).



Un mes más tarde, Chua andaba tras la pista de una nueva epidemia. Esta vez llamó a la puerta del Centro de Control y Prevención de Enfermedades (CCPE) de Fort Collins, Colorado. Confiaba en que sus equipos de técnica avanzada identificarían la naturaleza de un virus misterioso y letal que llevaba sigilosamente guardado en la bolsa de viaje, bajo sus pies.

Desde el aire, conforme se alejaba del nuevo aeropuerto de Kuala Lumpur, en dirección a Taipeh, veía a su izquierda las cuadras de ganado caballar y porcino cercanas a Ipoh. Allí había surgido esa extraña enfermedad en septiembre. Antes de extenderse había dado ya muestras de su virulencia; con 26 víctimas, era el mayor brote epidémico de encefalitis japonesa en Malasia en más de 25 años.

Pero el virus se había ya propagado. A su derecha quedaban ahora los palmerales de Negri Sembilan, el corazón de la región porcina de Malasia. Sin duda, más de un granjero desesperado, al amparo de la oscuridad, había encontrado algún portillo en la cuarentena y envió sus cerdos a Ipoh para su venta o despiece. ¿Cómo iba a saber un campesino iletrado el vendaval de fuego económico y biológico que iba a desencadenar? ¿Cómo iba a barruntar que cientos de personas —en su mayoría hombres hechos y derechos— arderían de fiebre y delirio hasta entrar en coma y morir? ¿Cómo imaginar el abandono de pueblos enteros, tras el contagio de una de cada tres viviendas? ¿Cómo adivinar que los soldados, protegidos con máscaras de gas, abrirían fuego contra piaras enteras, diezmando una pujante industria de exportación? ¿Cómo advertir que su ejemplo se multiplicaría, que no sería el único en pasar a escondidas cerdos a través de cortes de carretera, de un estado a otro, en una reacción en cadena sin un final claro?

La administración sanitaria repetía que se trataba de encefalitis japonesa (EJ), enfermedad que puede frenarse con una vacuna. Además, tranquilizaba, los cerdos proporcionan un huésped al virus EJ en el que puede multiplicarse; pero los cerdos no lo transmiten directamente a los humanos: lo hacen los mosquitos. Hasta entonces, las fumigaciones antimosquitos y las vacunaciones en masa habían extinguido siempre los brotes de epidemia de EJ. El gobierno había tomado ambas medidas.

Ante una enfermedad nueva siempre cabe el riesgo de que se la confunda con otra ya registrada. El agente aprovecha ese tiempo de incertidumbre para propagarse. Y si la enfermedad se transmite a través del cerdo, un bien preciado, en vez de ser el mosquito su portador, siempre habrá quien intente burlar los esfuerzos del gobierno por suprimir el vector vírico.

Chua estaba convencido, mediado marzo, de que no se trataba de un brote más de encefalitis japonesa. Había realizado el cultivo de una muestra vírica extraída de la sangre y líquido cefalorraquídeo de tres pacientes. Cuando aisló al agente comprobó que no era nada que él o Lam hubieran visto antes.

Las muestras llegaron el primero de marzo al laboratorio de Chua en el Hospital Clínico de Kuala Lumpur. Procedían de un camionero de Sungai Nipah y dos víctimas de Bukit Pelanduk, que acababan de fallecer en la sala de urgencias. Constituían la confirmación clínica de que la enfermedad se había instalado en Negri Sembilan. “El



aflujo de nuevos pacientes resultó inquietante", recuerda Goh Khean Jin, neurólogo del hospital.

No era sólo el número lo que movía a preocupación. Los síntomas se ajustaban al perfil de la encefalitis japonesa, no así las víctimas. Debido a su propagación por insectos, explica Goh, "la EJ afecta a los más jóvenes y a los más ancianos; ataca de manera aleatoria. Pero ahora caían sobre todo varones adultos, no niños. En algunas familias, de cinco miembros cuatro enfermaban, quedando exento el quinto. Además, tres cuartas partes de los pacientes estaban vacunados contra EJ al menos en una ocasión. Tras muchas indagaciones y palos de ciego, reparamos en que casi todos tenían que ver con granjas de cerdos; eran dueños o trabajaban en ellas".

Cada vez se parecía menos a una enfermedad transmitida por insectos. Hasta entonces todas las víctimas habían estado en contacto con cerdos, en muchos casos se trataba de animales que tosían o jadeaban por algún mal extraño, lo que resulta, a su vez, raro, pues el virus de la EJ no ataca a los cerdos, su huésped natural.

Se había requerido a Chua y Lam para que confirmaran si las muestras contenían anticuerpos contra la encefalitis japonesa, es decir, si los pacientes habían sido infectados con el virus EJ o se habían vacunado contra él. Chua y Lam decidieron ir más allá. Si lograban cultivar suficiente virus, podrían observarlo. Tal vez, pensaron, sería una cepa mutante, que se escapara del paraguas protector de la vacuna.

Se encerraron en el laboratorio de riesgo biológico. Vertieron gotas de líquido infectado en cultivos de células renales de cerdos y monos; también los inyectaron en larvas de mosquito y ratones lactantes. "No sabíamos realmente lo que buscábamos. Queríamos hacer un barrido por todo el campo."



Chua examinaba los cultivos dos o tres veces al día, por si aparecían señales de infección. Muchos patógenos crecen sólo en determinados niveles de *p*H o temperatura. Dos años antes, cuando Chua había aislado un enterovirus que atacó a miles de compatriotas, "tardó diez días en encontrar las condiciones adecuadas para el crecimiento", recuerda.

Pero el nuevo agente mostraba mayor vigor. Crece prácticamente por sí solo y muy deprisa. A los tres días, las células de mono empezaron a morir. Al quinto día, muchas de las que quedaban se habían fundido, cual gotas de agua, en vesículas celulares gigantes, dotadas de múltiples núcleos. Las larvas de insecto —el huésped más sensible ante el virus de la encefalitis japonesa— permanecían sanas.

Durante una semana, Chua sometió al virus a un sinfín de pruebas de anticuerpos. Salió negativa la prueba para el virus EJ; negativa también para el sarampión. Ensayaron cuantas pruebas involucrasen virus agentes de encefalitis: herpes simple, virus del dengue, panenterovirus, citomegalovirus, virus sincitial respiratorio. Todas, negativas. "Bajo el microscopio electrónico", cuenta Lam, "las partículas víricas presentaban una talla respetable, lo que constituía una pista de que quizá nos halláramos ante un paramixovirus", un primo tal vez de los patógenos responsables del sarampión, las paperas y otras enfermedades muy contagiosas.

"Recuerdo que bajé al laboratorio de Chua aquel día", interviene Goh. "¡Mira, tenemos un nuevo virus!, me espetó. Se le veía asustado. Habíamos estado en contacto directo con las víctimas, limpiándolas. En el laboratorio de Chua se estaban realizando cultivos masivos sin protección. Considerado, sin embargo, desde una óptica científica, el momento resultaba excitante."





3. Mike Bunning del CCPE busca entre las granjas de cerdos arrasadas de Bukit Pelanduk (*izquierda*) ratas infectadas para su ulterior disección (*arriba*).

Si era un paramixovirus el causante de la encefalitis, no podía transmitirse por insectos. De nada valdrían fumigaciones y vacunaciones contra la encefalitis japonesa. Eso lo sabía Lam. Pero carecía del equipo para dilucidarlo sin ambigüedad, al tiempo que sufría la presión de un tiempo apremiante que iba multiplicando el número de víctimas. Lam decidió aceptar la ayuda que le ofrecía un viejo amigo del CCPE en Fort Collins. Y puesto que ninguna compañía de mensajería quiso transportar la prueba, al día siguiente del descubrimiento, Chua introdujo con sumo cuidado sangre, líquido cefalorraquídeo y cortes de cerebro humano infectados en una cápsula metálica hermética, resguardada por hielo seco. Tomó el camino del aeropuerto.

Setenta y dos horas después, los expertos del CCPE, guiados por Chua, reprodujeron sus resultados pero fracasaron también en la identificación del virus. “Lo habíamos previsto; por eso, habíamos enviado muestras a la sede central del CCPE en Atlanta”, comenta Lam. De Atlanta justamente llegarán las primeras noticias inquietantes. El virus, que Lam y Chua bautizaron con el nombre de Nipah en recuerdo del pueblo de la víctima que suministró la primera muestra cultivada, era completamente nuevo para la medicina. Pero compartía un 82 por ciento de su secuencia de ADN con el virus Hendra, famoso por haber matado 14 caballos de carreras y a su entrenador en 1994 en la australiana Queensland. El virus Hendra lo transmiten murciélagos frugívoros, mamíferos que viven en casi todas las partes de Malasia, y, como es de suponer, no confinan su vuelo a las fronteras territoriales.

Brian Mahy, director de la división de enfermedades víricas del CCPE, remitió un mensaje electrónico a Lam con las noticias y con la oferta de enviar un equipo de diez expertos, incluidos dos veterinarios australianos, para ayudar en la investigación. El Ministerio de Sanidad aprobó la colaboración.

“En la segunda semana de marzo, los servicios de urgencias estaban saturados”, recuerda Patrick Tan, quien sirvió en la unidad de cuidados intensivos del hospital clínico. De la cadencia de ingresos se infería una cepa poderosa. Hubo que conseguir más ventiladores, buscar más enfermeras. Se pospusieron las intervenciones quirúrgicas optativas. Familias que habían abandonado sus hogares, abarrotaban los pasillos. La gente se hundía ante aquel espectáculo de muerte. “Hasta tres bajas diarias”, explica Tan. “Veías a un hijo morir a la siete de la mañana y a su padre fallecer al mediodía. Nos hallábamos ante un agente letal desconocido muy peligroso.”

El asunto no sólo era médico. La demanda de cerdo, consumido casi exclusivamente por la minoría de etnia china, había caído cerca del 90 por ciento, desmoronándose así uno de los pocos pilares estables de la economía, muy debilitada ya de por sí desde la crisis monetaria del año pasado. “Entre granjeros, matarifes, carniceros y camioneros, se ha visto afectada alrededor del 10 por ciento de la población china de aquí”, comenta Lam. Aunque en Malasia las grandes poblaciones de hindúes y malayos musulmanes no se habían levantado contra

China, como había ocurrido en la vecina Indonesia, se temía que las noticias de enfermedades letales transmitidas por los cerdos pudieran despertar una hostilidad de base religiosa.

Se esperaba que, con la identificación del virus, aflorarían sugerencias para confinarlo. El CCPE había confirmado que el patógeno pertenecía a la familia Paramyxoviridae, según sospechara Lam. "Se trata, pues, de un virus de ARN rodeado por una envoltura lipídica. No resulta difícil inactivarlo con calor o detergentes", aclara Lam. Se explicó al público la inocuidad del cerdo cocinado, pero nadie se atrevía a comprarlo. Y aunque quedaba claro que se podían desinfectar las cuadras con vaporizadores de jabón, el ejército, musulmán en la mayoría de sus componentes, redujo a escombros muchas granjas.

No le toca la lotería a quien le cae en suerte un paramixovirus por enemigo. Sin fármacos eficaces, los microbiólogos sólo pudieron proponer uno, la ribavirina. "Es cara", dice Tan. "Pero no teníamos nada más para dar a esos pacientes, así que lo intentamos."

Muchos paramixovirus provocan infecciones respiratorias que se propagan en forma de aerosol, medio de transmisión muy directo. "Sabíamos que el virus provoca en los cerdos una tos terrible, la 'tos de una milla', que se oye a un kilómetro de distancia. Así se contagian los cerdos", explica Lam. "En humanos el virus aparece también en la orina y en las gárgaras, pero ignoramos hasta qué punto son infecciosas tales secreciones. Viene a ser como el VIH; el virus aparece en la saliva, aunque en cuantía insuficiente para transmitir la infección."

A finales de marzo el brote epidémico alcanzó su clímax. Ni un solo médico o enfermera contrajo el virus Nipah, lo que respaldaba la hipótesis de que no es fácil una transmisión directa entre humanos. Mas, para estar a salvo, la CCPE asignó provisionalmente el patógeno al nivel 4 de bioseguridad. Son muy pocos los laboratorios preparados para manipular sin peligro ese grupo de elite de los agentes más letales y contagiosos, en el que se encuadran el virus del Ebola, Marburg y Lassa. En Malasia no existe ningún centro protegido con esas medidas cautelares.

Para detener el brote epidémico y salvar el mayor número posible de vidas había que dar solución a tres cuestiones cruciales: ¿Qué alteraciones somáticas produce en el organismo el virus Nipah? ¿Qué animales lo transmiten? ¿Cuál es su huésped natural, donde medra sin causarle la muerte?

Para percibir los trastornos anatómicos operados por el virus Nipah basta pasearse por las salas de encefalitis del hospital clínico, acompañando al neurólogo en su ronda matinal. Dos semanas después del paroxismo epidémico, la sala sigue llena. Muchos pacientes se hallan en estado vegetativo, como ese granjero cuyos globos oculares dan vueltas de forma insensible mientras el neurólogo C. T. Tan levanta sus párpados y le ruega que fije la mirada.

Goh se acerca a otro paciente. Diríase dormido, si no fuera porque el monitor cardíaco revela un ritmo de 130 pulsaciones. Hay a su lado, solícita, una mujer joven. "Hola. Señor Ching", saluda Tan. "Hola." No hay respuesta, salvo muecas imperceptibles cuando un interno le golpea las rodillas con un martillo de caucho. La mujer se aprieta fuertemente sus manos enfundadas en guantes de látex y mira al médico con miedo en sus ojos. El séquito reanuda la ronda.

"En ésta confío mucho", avanza Goh mientras nos acercamos a una mujer de mediana edad. "Dos semanas atrás estaba en coma. Ahora puede hablar algo. Casi anda sola." A indicación de Tan se ase de su brazo para dar unos pasos; indecisa, se para y tambalea. Sus párpados se cierran.

Ni Goh ni nadie saben si quienes se esfuerzan por recuperar la salud podrán conservarla. La comitiva se detiene ahora ante la cama de un joven de 31 años, mozo de granja en Bukit Pelanduk; sufre convulsiones en silencio mientras las enfermeras le asisten. "Tratamos a este hombre con ribavirina; a la semana parecía restablecido y se le dio el alta", recuerda Goh. "Pero volvió con nuevos síntomas." Se iba recuperando también de estos últimos cuando de repente sufrió una hemorragia cerebral. "Tiene un pronóstico nada halagüeño."

Preocupan las recaídas. Un cuidador de caballos australiano que contrajo el virus Hendra en 1994 se restableció, y trece meses después, desarrolló una encefalitis que le llevó a la tumba en pocos días. Cabe la posibilidad de que los cientos que han sobrevivido a la infección de Nipah corran aún peligro. Habrá que seguir su evolución durante varios años.

En los sótanos del hospital, Wong Kum Thong, neuropatólogo, se encamina hacia unos frascos de colores brillantes guardados en las estanterías de la pared que da a la sala de autopsias. "Tenemos que estar seguros de que hemos observado todos los cambios posibles causados por esta enfermedad", comenta, mientras saca una víscera cardíaca de un frasco. Tras extraer una capa gruesa de grasa, corta una sección fina de aorta y se la entrega a un ayudante para que la etiquete.

"Es muy baja la probabilidad de observar al azar un fenómeno importante en una sección dada; tienen que analizarse muchas, muchas preparaciones", dice Wong. Ha continuado con el estómago de una de las víctimas del virus Nipah. "Hay que dedicar horas al microscopio examinando y reexaminando muestras. Es un trabajo muy tedioso, como la mayoría en ciencia."

No faltan los instantes fugaces de descubrimientos. Las preparaciones de Wong han revelado que el virus Nipah ataca las células que tapizan los vasos sanguíneos. Así incapacita a la víctima, mediante el bloqueo del suministro de sangre al cerebro. Pero el virus puede infectar también las neuronas directamente; se insiere en ellas hasta que estallan. Y eso no es todo.

"Ven y mira esto." Wong extrae de un frasco azul un encéfalo suspendido por un cordón. Está sembrado de manchas y líneas marrones, que dan fe de infinitas hemorragias amorfas. Pero lo que ha atraído la atención de Wong son unos puntitos negros, del tamaño de una cabeza de alfiler, dispersos por la superficie del cerebro. "No había visto nada parecido."

"Demasiado grandes para ser roturas puntuales de capilares", apunta George Paul, patólogo forense del hospital. "Debemos fotografiarlos." Wong asiente. "Con una autopsia más, podría estudiar al microscopio electrónico vasos y neuronas del cerebro. Valdría la pena contemplar el virus en operación. Seguimos sin saber la viabilidad del virus tras la muerte."

Un día después, Chua trabaja en el laboratorio de riesgo biológico; prepara muestras de suero para su ensayo. No se cuenta con una prueba de sangre definitiva para la infección por Nipah. De momento parece servir un ensayo de búsqueda de anticuerpos contra



4. Los puntos negros misteriosos del cerebro de una víctima del virus Nipah plantean una más de las muchas cuestiones sin responder acerca de la enfermedad.

Hendra. Pero no es lo que necesita Chua, que busca saber si el sistema inmunitario lucha también contra el virus Nipah con células T, su arma más poderosa, y si puede eliminar la infección o, al igual que el VIH, sólo logra una remisión temporal de la misma.

Suena el timbre del laboratorio de Chua; es Wong. "Tenemos un caso de encefalitis. Hay que proceder a la autopsia". El paciente de 31 años acaba de morir. "Sería estupendo poder obtener virus viable del cerebro. Pero no quiero exponerme. ¿Cómo debería traerte el cerebro?" Esta es la oportunidad que ambos habían estado esperando: el examen del cerebro tras el ataque del sistema inmunitario. Las defensas del mozo de cuadra habían ganado la batalla, pero acababan de perder la guerra.

Los hallazgos permitidos por autopsia se han convertido en una pieza más del rompecabezas. Con suerte y muchos años de trabajo, Lam u otros encontrarán una vacuna para esta encefalitis malaya nueva. Mientras tanto, los veterinarios están todavía buscando el huésped natural del virus Nipah y pistas que indiquen la extensión que ha alcanzado.

La solución adoptada por el gobierno de Malasia para combatir el brote epidémico fue radical: matar todos los cerdos que hubiera en un radio de cinco kilómetros de cada granja infectada. Los pequeños ganaderos de Bukit Pelanduk, temerosos de ver arrasadas sus casas por el ejército, cavaron hoyos, reunieron sus cerdos y los enterraron vivos. Otros mataron sus cerdos a palos. En sólo tres semanas, se sacrificaron 900.000 cabezas. Los casos de encefalitis empezaron a disminuir.

Semanas más tarde, las casas de Sungai Nipah y Bukit Pelanduk siguen vacías. Todavía se ve la ropa tendida o los juguetes abandonados en el patio. La demanda de cerdo ha caído en picado. Una industria que llegó a aportar 1500 millones de ringgits malayos (unos 63.000 millones de pesetas) al año tardará un lustro largo en recuperarse.

Quizá mucho más. En mayo un programa nacional de muestreo revelaba que el virus Nipah se había propagado a otros estados: Selangor, Johore, Malaca, Penang, la mitad occidental del país. Uno de los expertos veterinarios australianos declaró que una cuarta parte de cierta especie de murciélagos frugívoros atrapados en algunas regiones eran portadores de anticuerpos contra el virus. Se desconoce todavía, sin embargo, si los murciélagos son los huéspedes naturales del virus, y, si lo son, qué significado tiene para la cría del ganado de cerda del sudeste asiático.

"Sólo podemos confiar en que la enfermedad sea cíclica", dice Lam, "con amplios intervalos de un episodio a otro", tiempo suficiente para desarrollar una vacuna o hallar un tratamiento eficaz. "Mientras mantenemos esta confianza, añade Patrick Tan, esperemos que no haya virus más horribles que el Nipah a punto de salir de su ecosistema y aflorar en el nuestro."

El futuro de la computación

El Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT está desarrollando una nueva infraestructura —el sistema Oxygen— para las técnicas de información, que promete hacer realidad una visión largamente acariciada por el director del centro: lograr más, haciendo menos

Michael L. Dertouzos

El año pasado, varios miembros del Laboratorio de Ciencias de Cómputo del Instituto de Tecnología de Massachusetts viajábamos en avión a Taiwan. Llevaba yo unas tres horas tratando de hacer funcionar en mi nuevo ordenador portátil una de esas tarjetas insertables, para consultar mi agenda. Pero cuando el programa de la tarjeta parecía sentirse a gusto, el sistema operativo protestaba, y viceversa. Fastidiado, pedí ayuda a Tim Berners-Lee, mi vecino de asiento, quien la ofreció gustoso. Una hora más tarde, sin embargo, el inventor de la Telaraña admitía que la tarea excedía de sus capacidades.

Recurrí entonces a Ronald Rivest, coinventor del sistema RSA de criptografía de clave pública. Dando prueba de sabiduría, cortésmente declinó. En este trance, intervino uno de nuestros profesores más jóvenes: "Estáis mayores, colegas. Dejadme a mí." También él, al cabo de hora y media, hubo de renunciar. Así que volví a mi método "experto", que consiste en ir pulsando teclas al azar en las distintas pantallas de asistentes y dirigentes que iban apareciendo sin cesar, hasta que por puro azar logré que funcionase... tres horas después.

Tal vía crucis, harto habitual, pone de relieve una cuestión importante: durante los primeros cuarenta años de las ciencias de cómputo, nos hemos ocupado en suministrar a nuestras máquinas técnica acorde con sus necesidades. Diseñamos uno por uno los sistemas y subsistemas, y después los arrojamos al público, confiando en que los usuarios sepan poner de acuerdo a los distintos componentes. La imagen que evoca en mí este proceder es la de un coche concebido de tal modo, que el conductor tuviera que manipular una por una docenas de manecillas para ajustar la mezcla de carburante, el avance de encendido y la apertura de las válvulas, y mil rutinas más, cuando lo único que desea es ir de un sitio a otro.

Lograr más, haciendo menos

Pero hora es de decir basta. Ha llegado el momento de que cambiemos nuestra disposición mental, polarizada en la máquina, e inventemos para las gentes de la Era de la Información el volante y los pedales de acelerador y freno que sirvan para conducirlas. En el futuro inmediato que distingo las nuevas técnicas de la información han de servir para lograr mayor fruto con menor trabajo.

Cuando digo "Lograr más, haciendo menos", entiendo tres cosas. Primera, hemos de llevar las nuevas técnicas a nuestras vidas, y no al contrario. No vamos a lograr más si, abandonando nuestras vidas actuales, revestidos de anteojos y trajes especiales, nos adentramos en un ciberespacio metálico infestado de gigaoctetos. La revolución industrial no nos lanzó al motorespacio. Los motores han llegado hasta nosotros integrados en refrigeradores, donde conservar los alimentos, o en vehículos para el transporte. Esta es la clase de transición que espero que acontezca con los ordenadores y las comunicaciones: que se integren en nuestras vidas, que su identidad sea sinónima de las tareas útiles que realicen.

En segundo lugar, las nuevas técnicas han de ser fáciles de usar y capaces de incrementar la productividad de los humanos. Imaginemos posible sacar un aparato del bolsillo y decirle "Vamos a Atenas este fin de semana". Mi ordenador conectaría con el sistema EasySabre de reservas aéreas y comenzaría a interactuar con él, utilizando los mismos comandos y claves habituales en las agencias de viajes. La máquina sabría de antemano que "Vamos" representa dos personas, que nos gusta viajar en primera clase, que preferimos asientos de pasillo, y demás detalles. El artilugio podría seguir interactuando con el ordenador de la aerolínea durante, quizá, diez minutos, hasta encontrar un vuelo aceptable y confirmarlo. Yo podría haber dedicado tres segundos a emitir mi mandato, mientras que mi esclavo electrónico —el programa del aparatito— habría estado trabajando durante 10 minutos, o sea, 600 segundos. En este ejemplo, la productividad humana se ha multiplicado por 600 dividido entre 3, es decir, 200, o en términos comerciales, en un 20.000 por ciento.

Tan enormes ganancias no serán factibles en todo, como es obvio. Pero sí confío en que a lo largo del siglo XXI aumentaremos la productividad humana en un 300 por ciento, por la automatización en las oficinas

ASI SERA UN DIA CUALQUIERA de los usuarios de Oxygen. Cinco compañeros de trabajo pueden tomar una pronta decisión gracias a la capacidad del sistema para localizarlos, mantenerlos en contacto y efectuar las averiguaciones necesarias.



1 EN PARIS, Jane acaba de encontrar unos locales atractivos para la sede de su empresa en Francia, y utiliza su Handy 21 para localizar a Joe, su jefe.



2 EL HANDY de Jane “olisquea” el entorno electromagnético, detecta una red de telefonía móvil y llama a Joe a Nueva York.



3 EL ENVIRO 21 de Joe, instalado en la pared de su despacho, responde al teléfono, al que está conectado. Reconoce la voz de Jane, percibe la urgencia y traslada la llamada a Boston, donde Joe está conversando con el gerente local.

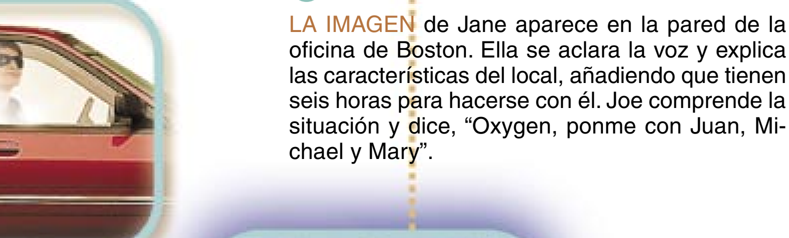


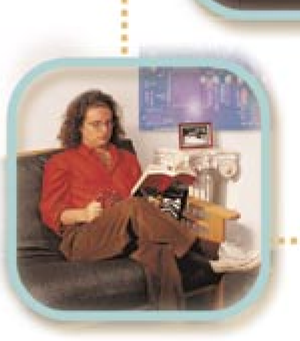
4 LA OFICINA de Boston también está equipada con un Enviro 21, que acepta la llamada. Detecta que la puerta del gerente está abierta, y basándose en un guión de automatización, determina que puede interrumpir.



5 LA IMAGEN de Jane aparece en la pared de la oficina de Boston. Ella se aclara la voz y explica las características del local, añadiendo que tienen seis horas para hacerse con él. Joe comprende la situación y dice, “Oxygen, ponme con Juan, Michael y Mary”.

6 OXYGEN encuentra a Juan, que ha salido a hacer ejercicio, a Michael, que está en casa, y a Mary, que viaja en su coche a Chicago, y conecta con ella a través del ordenador Enviro 21 instalado en el maletero.







7 EN POCOS SEGUNDOS, Net 21 crea una región de cooperación. Mientras los cinco compañeros conferencian, dicen cosas como “Oxygen, dame el mapa del mensaje de Lori” o “Encuentra en la Telaraña información sobre esta nueva sede.”



8 “DE ACUERDO, nos lo quedamos”, concluye Joe. Apunta su Handy hacia la impresora y ordena: “Oxygen, envíanos copias de los documentos que hemos consultado.”

de las tareas rutinarias, volcando trabajo cerebral y visual en nuestras "máquinas excavadoras" electrónicas. Semejante transformación acontecerá de igual modo que durante la revolución industrial el trabajo muscular se trasladó a las palas excavadoras. Por ahora tenemos que pinchar en las pantallas de los navegadores o del correo electrónico, obligar a nuestros globos oculares a mirar al sesgo y estrujarnos el cerebro. Trabajamos todavía "con pico y pala", pero no nos damos cuenta porque las palas que utilizamos están engastadas con diamantes y llevan el marchamo de "alta técnica". Por tanto, si se pretende una auténtica revolución, hemos de revolucionar también nuestras expectativas sobre lo que los ordenadores pueden hacer por nosotros.

Hasta la fecha, los vendedores de ordenadores han abusado del remoquete "fácil de usar". Cuando afirman que un sistema es "benévolo", lo que están haciendo es vestir a un chimpancé con bata de médico y exhibirlo, haciéndolo pasar por cirujano. Cuando aludo a "facilidad de uso" no pretendo decir que hayamos de dotar a nuestros sistemas de más colorines ni de más animalitos flotantes por las pantallas. Quiero decir que han de ser auténticamente sencillos de manejar, no importa que la interacción se realice sólo mediante texto. Me resulta inconcebible que las diferencias entre navegadores y sistemas operativos vayan a durar más de unos pocos años. Unos y otros acceden a información —a distancia los primeros, localmente, los segundos— y puesto que la información se necesita para unas mismas cosas, con independencia de donde resida, la facilidad de uso exige que el sistema de comandos de unos y otros sea el mismo. La situación actual es tan ridícula como si el volante de nuestro coche sirviera para girar en las ciudades y, en carretera, para aplicar los frenos.

el mundo. De hecho, un restringido grupo de estudiantes del Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT ha construido una sede en la Telaraña (www.compassion-corps.org) con ese fin preciso. Y la ayuda no tiene por qué ir siempre desde el mundo desarrollado hacia el mundo en desarrollo. Podríamos imaginar a un médico en Sri Lanka ganando 20 dólares diarios atendiendo a los sin techo de Boston a través de un quiosco regentado por una enfermera y equipado con un enlace de vídeo y una conexión remota a instrumental médico. El servicio podría costar 5 dólares por consulta, y aunque no fuera perfecto, sería mejor que la completa carencia de atención médica.

Esto es, pues, lo que yo entiendo cuando afirmo que se debería lograr más haciendo menos: llevar la técnica a nuestras vidas, facilitar su empleo, aumentar la productividad y ofrecer a todos estas ventajas. Pergeñada la meta, echemos un ojeada al modelo informático sobre el que esta visión se extiende.

El mercado de información

Mi modelo del mundo de la información en un futuro cercano es el mismo del que he venido hablando a lo largo de los veinte últimos años, el Mercado de Información. En el decenio venidero, medio millardo de máquinas controladas por personas y un sinfín de ordenadores —materializados en accesorios, sensores, controladores y similares— se hallarán interconectados. Y estas máquinas, y sus usuarios, realizarán tres cosas: comprar, vender e intercambiar información y servicios. En la actualidad, unos 50 millardos de dólares cambian de mano a través de Internet. Estimo que, hacia el 2030, este flujo se habrá elevado hasta unos cuatro billones de nuestros dólares actuales, o sea, una cuarta parte del producto industrial mundial. Provendrá, sobre todo, del sector servicios, que da cuenta de la mitad de esa economía general. De hecho, una gran parte de los servicios de información del futuro entrañará un nuevo tipo de actividad: la compraventa de trabajo de información. Imaginemos a 1000 contables en Pekín prestando sus servicios a General Motors pagados a 1 dólar por hora.

Seguimos sin poder oír la voz de miles de millones de personas, salvo por informaciones de la televisión o del gobierno.

La última forma en la que las nuevas técnicas pueden facultarnos para lograr más haciendo menos es dando cabida en ese "nos" a todos y cada uno. Nos sentimos ufanos porque hay en nuestros días unos 100 millones de máquinas interconectadas. Sin embargo, esa cifra representa sólo al 1,6 por ciento de la población mundial. Creemos que el mundo está en amplia comunicación, pero seguimos aún sin poder oír las voces de miles de millones de seres, salvo por lo que digan la televisión o los gobiernos. Además, la revolución de la información, abandonada a sus propios recursos, distanciará todavía más a ricos y pobres, por la sencilla razón de que los ricos utilizarán sus máquinas para ser más productivos y, por tanto, más ricos, mientras que los pobres seguirán donde ahora están.

No podemos permitir que esto ocurra. Si tomamos la decisión de ayudar, las posibilidades son inmensas: los ricos podrían utilizar el nuevo mundo de información para adquirir de los pobres servicios y productos, como antes se hizo con las manufacturas. Un Cuerpo de Empatía Virtual podría, por primera vez en la historia, poner en comunicación a quienes están dispuestos a ofrecer ayuda humana a quienes la necesitan, en todo el mundo.

No menos importante será la porción de "libre intercambio" del Mercado de Información. Afectará a nuestras vidas mediante mensajes de familia, actividad cooperativa, acceso a conocimientos o a su elaboración, intercambio de todo tipo (político, literario o social), amén de muchas actividades nuevas.

Descritos el modelo "lograr más, haciendo menos" y el modelo "Mercado de Información", ¿cómo llegaremos a ellos en la práctica? A tal fin hemos lanzado, en el Laboratorio de Ciencias de Cómputo, un ambicioso proyecto de investigación. Confiamos en que fructifique en un sistema de elementos tangibles y de programas radicalmente nuevos. Ese sistema, al que hemos llamado Oxygen, lo queremos cortado a la medida de las personas y de sus aplicaciones, y que llegue a ser tan ubicuo

como el aire que respiramos. En este proyecto, con un plazo de cinco años para su realización, dotado de un presupuesto de varios millones de dólares, participan unos treinta profesores del Laboratorio de Ciencias de Cómputo, en colaboración con el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT.

El diseño de Oxygen

En el corazón del sistema Oxygen se encuentra el Handy 21. Parecido a un teléfono móvil, está provisto de una pantalla de presentación, de una cámara, de detectores de infrarrojos y de un ordenador. El Handy 21 nos aporta la ayuda que necesitemos allí donde nos encontremos. Es, además, totalmente configurable mediante programación, pues se puede transformar, invirtiendo un bit (en cualquier país) de teléfono móvil, a transceptor múltiplex que comunique con otros Handy 21, a nodo de una red inalámbrica de alta velocidad de una oficina o a una simple radio de FM. Los artículos de Anant Agarval y de John V. Guttag, en este mismo número, se ocupan de este aspecto de Oxygen.

El segundo elemento técnico clave de Oxygen es el Enviro 21. A diferencia del Handy, compañero de las personas, este otro dispositivo permanece anclado en los ambientes de aquéllas. Está integrado en las paredes de la oficina y del hogar e incluido en el maletero del coche. El Enviro 21 guarda con el Handy 21 la misma relación que una toma de la red eléctrica con una batería. Hace todo cuanto el Handy 21 realiza, pero con velocidad y capacidad mucho mayores. Los Enviro 21 pueden también ser ajustados para la regulación de toda clase de dispositivos y equipos eléctricos: sensores, controladores, teléfonos, máquinas facsímiles e instalaciones de cámaras o micrófonos.

Oxygen interactúa con el mundo físico inanimado por medio de estos accesorios controlables y a través de los detectores de infrarrojos de los Handy 21. Si una puerta es objeto de interés para nuestras máquinas, se le adhiere una pegatina infrarroja. Hecho esto, cuando otras personas apuntan sus Handy 21 a esa puerta, las máquinas leen la identidad de la puerta y muestran lo que es de esperar que se encuentre tras ella. Dicho de otro modo, el sistema proporciona una especie de visión en rayos X, franqueando la interacción con los objetos físicos de interés que haya en su ambiente.

Los Handy 21 y los Enviro 21 estarán vinculados mediante una red de nuevo tipo, Net 21. Tendrá por misión principal crear una región "de colaboración" segura entre usuarios de Oxygen que deseen ponerse en contacto, estén donde estén. La Net 21 ha de lograrlo a caballo de la enorme y ruidosa Internet. Ha de estar capacitada para habérselas con cambios incesantes, al surgir y desaparecer agregados de nodos participantes. Tiene que dar con nosotros dondequiera que nos encontremos. Debe conectarnos a numerosos aparatos. Y tiene que conectar con la red mundial. No es todo ello grano de anís. Oxygen va a exigir un enfoque radicalmente nuevo de los protocolos de red, basado en la autoorganización y la adaptación, que amplíe la Internet de hoy.

Oxygen ha de entrañar también recursos perceptuales, en especial, de la comprensión del habla. Ha de atender a la necesidad intrínseca de comunicación natural que los humanos tenemos; no hemos nacido con teclados y puertos para ratón, sino con bocas, ojos y oídos. En Oxygen, la comprensión del habla queda subsumida en el sistema; todos los elementos del sistema y todas las aplicaciones utilizarán el habla. Los sistemas construidos por Victor Zue y su grupo pueden manejar dominios de indagación restringidos, como las consultas sobre el tiempo meteorológico o las compañías aéreas. Estamos ahora cosiendo entre sí estos estrechos dominios —incorporando también visión y gráficos donde sea necesario— para formar un nuevo cobertor, capaz de cubrir más amplio frente de comunicaciones entre humanos y máquinas.



La quinta técnica de Oxygen se ocupa de nuestra necesidad de dar con información útil. Oxygen se prepara para que podamos revisar primero nuestros propios almacenes de conocimiento por métodos que nos sean familiares. El sistema nos permitirá decir, sencillamente, "Búscame ese extenso documento rojo que llegó hace un mes", prescindiendo de códigos de referencia y de otros datos. Oxygen sabrá también consultar los almacenes de amigos y asociados que se avengan a compartir sus conocimientos con nosotros, de igual forma que podemos preguntar a un amigo o colaborador lo que no sabemos. Por último, Oxygen podrá buscar en los inmensos almacenes de información de la Telaraña, y "triangular", poniendo en relación lo que descubra en ellos con las bases de conocimientos almacenados, nuestras o de nuestros asociados.

Oxygen permitirá igualmente que las personas descarguen sus trabajos pesados y repetitivos en sus "máquinas excavadoras" electrónicas. Ayudará a los usuarios a preparar "guiones" para la automatización de tareas, amén de supervisar y controlar los muchos aparatos conectados a los Enviro 21. "Enciende la calefacción." "Imprímelo allí." "Todos los días, a las 12, dame el valor de mi cartera y dime qué tiempo hace en Atenas." Oxygen se encargará de cumplir estas instrucciones mediante un bucle de control y razonamiento, que permite a la persona conducir la máquina sin tropiezos, mientras ésta realiza tareas automatizadas.

La técnica de colaboración del sistema ayudará a los usuarios a mantener el control de lo que hacen mientras

progresan. Por ejemplo, el sistema podría encargarse de ir llevando un resumen de lo tratado en una reunión, enlazado por hipervínculos, a partir de los comentarios que le proporcionaría de palabra un secretario humano. Si le preguntásemos qué decisión se tomó sobre, pongamos por caso, la construcción de un techo de cristal para un nuevo edificio, podría respondernos con las dos palabras del resumen del secretario —"Fue suprimido"—, pero si se desea, podría también dejarnos sondear más profundamente en la cadena de entradas de vídeo y de voz que condujeron hasta esa conclusión.

Por último, Oxygen contará también con técnica de adaptación, que ajuste la información a las necesidades de cada usuario. No habrá paquetes de programas envueltos en celofán, iguales para todos. Los programas serán "bajados" a los Handy 21 y a los Enviro 21 desde la red Net 21, sea por solicitud del usuario, por sus errores, o por la necesidad de actualizarlos. La técnica de adaptación permitirá también que los individuos adapten las máquinas a su conveniencia y hábito, mediante el uso de otras técnicas de Oxygen.

Una declaración y un deseo

Oxygen es, pues, una colección integrada de ocho técnicas nuevas: computadoras de mano, ordenadores instalados en la pared o en el maletero de un automóvil; una red de nuevo tipo; comprensión del habla subsumida en el sistema; acceso a conocimientos; colaboración, automatización y adaptación a la medida. La potencia de Oxygen no reside en las piezas individuales, sino en el conjunto armonizado de estas técnicas, orientadas hacia las personas. Forjan, en conjunto, una nueva metáfora informática que, esperamos, definirá un desplazamiento importante desde el escritorio y los iconos de nuestros días, al igual que éstos hicieron respecto a los sistemas textuales.

Iré más lejos. Estoy convencido de que las cinco técnicas correspondientes al reconocimiento del habla (y otras capacidades perceptuales), acceso a conocimientos, automatización, colaboración y adaptación a cada caso son las únicas verdaderamente nuevas. De los millares de cosas que podemos imaginar que vamos a hacer en el nuevo mundo de la información, estas cinco son los cimientos sobre los que se levantarán las actividades que nos ayuden a lograr más haciendo menos. Serán, cuando menos durante los decenios venideros, el volante de conducción, y los pedales de acelerador y de freno que estamos buscando, amén de las fuerzas conducentes a un Mercado de Información plenamente desarrollado.

Quienes deseen sacar partido del nuevo mundo de información deberían explorar las capacidades de las nuevas técnicas Oxygen. Cada individuo y cada organización tendrá acceso a ellas. Lograrán más haciendo menos quienes aprendan a integrar a su personal y a estas técnicas en un todo que ruede con el suave rumor de la máquina bien engrasada. Aplicaciones bien concebidas de la técnica Oxygen, que aprovechen el habla, el acceso a conocimientos, la automatización, la colaboración y la adaptación serán las que faciliten a las personas el fruto de todas sus posibilidades. Imaginemos una aplicación de atención sanitaria construida sobre Oxygen: para el acceso a conocimientos podría utilizar Medline (una base de datos revisable que reúne artículos de revistas médicas, mantenida por la biblioteca nacional de medicina de los EE.UU.) y las historias médicas de los pacientes de hospitales, disponibles ambas a través del habla. Podría automatizar tareas administrativas y médicas rutinarias, facilitar la colaboración entre médicos y muchas cosas más, tomando del sistema Oxygen subyacente su "personalidad" de aplicación.

Tengo la esperanza de que esta visión, materializada en Oxygen y en otros sistemas, nos ayudará a romper con nuestros 40 años de preocupación obsesiva por las máquinas para abrirnos a una nueva era informática "personalizada". Y al tiempo que vamos enfocando cada vez más nuestras técnicas hacia las necesidades humanas, tal vez podamos formular un deseo más ambicioso para el futuro. Las tres primeras revoluciones socioeconómicas pivotaron en torno a objetos: el arado, para la revolución agrícola, el motor, para la revolución industrial, y el ordenador, para la revolución informática. Tal vez sea llegada la hora de que el mundo considere una cuarta revolución, que ya no apunte hacia objetos, sino hacia la comprensión del más precioso recurso del planeta: nosotros mismos.

MICHAEL L. DERTOUZOS es director del Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT, cargo que ocupa desde hace 25 años.

Hablar con el ordenador

Las interfaces que funcionan con la voz permitirán en breve que los usuarios den instrucciones sin mover un dedo

Victor Zue

Durante decenios, los escritores de fantasía científica soñaron con un mundo donde la interfaz habitual entre los hombres y las máquinas fuera la voz. Se debe eso, en buena medida, a nuestro afán por conseguir que los ordenadores se comporten cual seres humanos. Pero hay algo más. La voz es natural: sabemos hablar antes de que aprendamos a leer y escribir. La voz es también un medio eficiente: la mayoría de las personas hablan unas cinco veces más rápido que teclean lo que dicen y probablemente 10 veces más rápido de lo que les cuesta escribirlo. Y la conversación es flexible: no se necesita ni tocar ni ver nada para sostener un diálogo.

Está entrando en el mercado la primera generación de interfaces que funcionan con voz. Hay entre ellas sistemas muy capaces, que reconocen decenas de miles de palabras. En los estantes de productos informáticos se expenden ya programas de dictado que reconocen la voz. Ofrecen estos productos IBM, Dragon Systems, Lernout & Hauspie y Philips. Otros sistemas pueden aceptar voces no registradas de llamadas telefónicas. Los laboratorios AT&T Bell fueron precursores en el empleo de sistemas de reconocimiento del habla para transacciones telefónicas. Nuance, Philips, SpeechWorks y otras acaban de introducirse en el sector. La técnica se aplica en servicios de asistencia virtual; por ejemplo, el servicio Pórtico de General Magic, que permite a los usuarios recabar noticias y cotizaciones bursátiles e incluso seguir el correo electrónico por teléfono. Pero el proyecto Oxygen necesitará sistemas de reconocimiento de voz mucho más avanzados.

Creo que la próxima generación de interfaces que funcionen con voz nos permitirá comunicarnos con los ordenadores de una manera muy parecida a la que nos comunicamos con otras personas. De ahí el interés por acotar en qué consista la idea de conversación. La técnica tradicional de reconocimiento de voz —que convierte señales audibles en símbolos digitales— debe perfeccionarse con programas de comprensión del lenguaje, para que el ordenador capte el significado de lo hablado.

Por lo que respecta a la salida, la máquina debe estar preparada para su propia expresión oral, obtener documentos de la Red, encontrar la información apropiada y tornarla en frases correctas. A través de este proceso, la máquina ha de poder trabar conversación con el usuario e incluso enmendar errores que éste pudiera cometer, consultando cuestiones tales como “¿Dijo usted Boston o Austin?”.

Galaxy al habla

En el Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT hemos dedicado los diez últimos años al estudio de sistemas dotados de interfaz dialógica. Pero las máquinas desarrolladas hasta ahora no son ningún prodigio de inteligencia. Abordan dominios de conocimiento limitados, tales como los pronósticos del tiempo o los horarios de vuelos. Pero la información está actualizada, y puede obtenerse por teléfono. Las máquinas pueden comunicarse en varios lenguajes; los tres a los que prestamos más atención son el inglés, el español y el mandarín. Estos sistemas pueden responder preguntas casi en tiempo real, esto es, con la fluidez con que se desenvuelve una conversación normal entre dos personas, si descontamos el tiempo que se tarda en transmitir la información por la Red.

Las aplicaciones que funcionan con voz logradas por nosotros se basan en Galaxy, que presentamos hace cinco años. Se trata de una arquitectura distribuida, lo que significa que todo el cómputo se lleva a cabo en servidores remotos. Galaxy recaba datos de varios dominios de conocimiento diferentes para responder a una demanda del usuario. El sistema puede encargarse de múltiples usuarios simultáneos y, por último, es móvil. Se puede acceder a Galaxy por teléfono; si además se dispone de una conexión a Internet, se le puede pedir a la máquina que transfiera los datos a nuestro propio ordenador.

Una conversación con Júpiter

Lo que sigue es la transcripción de una conversación telefónica entre Victor Zue y el sistema Júpiter de información meteorológica. El número de teléfono gratuito de Júpiter es el 1-888-573.82.55.

[Timbre del teléfono]

Júpiter: Hola. Bienvenido a Júpiter, el Sistema de Información Meteorológica del Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT. Esta llamada se está grabando con el fin de desarrollar el sistema. Puede colgar o pedir ayuda en cualquier momento. ¿Qué desea?

V.Z. ¿Cuál es el pronóstico de hoy para Boston?

[Suena una música durante siete segundos. Tras cada una de las siguientes preguntas de Zue, sigue una pausa de entre uno y tres segundos.]

Júpiter: Esta tarde, en Boston, parcialmente soleado y con viento. La máxima será de unos 10 grados. Por la noche, despejado, con la mínima en torno a los 2 grados. ¿Desea alguna otra información?

V.Z. ¿Va a llover mañana?

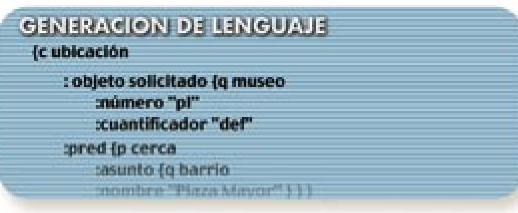
Júpiter: Que yo sepa, las previsiones no indican lluvias en Boston para mañana. ¿Algo más?

V.Z. ¿Y en Seattle?

Júpiter: No se prevé que llueva en Seattle mañana. ¿Desea saber alguna otra cosa?









LA ARQUITECTURA DE GALAXY esquematiza los cometidos que llevan a cabo las aplicaciones que funcionan con voz, como el sistema Voyager. El usuario plantea su cuestión; el sistema genera en respuesta una lista de conjeturas; traduce la mejor de ellas a órdenes que se utilizan para obtener información de una base de datos. La información extraída se condensa en una frase de respuesta, y un sintetizador del habla la recita.

Galaxy consta de cinco procedimientos principales: reconocimiento de voz, comprensión lingüística, obtención de información, generación de lenguaje y síntesis de voz. Cuando se le pregunta una cuestión a Galaxy, un servidor llamado Summit establece la correspondencia entre el lenguaje hablado y una fonemoteca, biblioteca de fonemas, que son las últimas unidades sonoras de las que se componen las palabras de todos las lenguas. Summit genera una lista de posibles frases, de conjeturas que realiza la máquina sobre lo que realmente se dijo. Para colegir el sentido de la mejor suposición, el sistema Galaxy utiliza otro servidor, llamado Tina, que aplica las reglas gramaticales básicas de análisis sintáctico: hallar el sujeto, verbo, complemento directo, etcétera. Tina recompone entonces la pregunta en un marco semántico, una serie de órdenes que el sistema puede entender. Por ejemplo, caso de que la pregunta fuera "¿Dónde está el museo del MIT?" Tina recompondría la interpelación en el comando "Localizar el museo llamado Museo del MIT".

Llegados a este punto, Galaxy puede buscar la respuesta. Un tercer servidor, Génesis de nombre, convierte el entramado semántico en una demanda formateada para la base de datos donde se encuentra la información. El sistema analiza la pregunta del usuario y determina entonces qué base de datos utilizar. Una vez obtenida la información, Tina dispone los datos en una nueva estructura semántica. Génesis convierte la estructura en una frase en el lenguaje del usuario: "El Museo del MIT se encuentra en Massachusetts Avenue, número 265, en Cambridge". Finalmente, un sintetizador comercial del habla en otro servidor más recita la frase.

Nuestro laboratorio ha creado hasta ahora una media docena de aplicaciones basadas en el sistema Galaxy a las que se puede acceder por teléfono. Júpiter ofrece información meteorológica de 500 ciudades de todo el mundo. Pegasus proporciona los horarios de 4000 vuelos comerciales diarios en los Estados Unidos, actualizados cada dos o tres minutos. Voyager es un callejero y una guía para el tráfico en el área de Boston. Para pasar de una aplicación a otra, el usuario se limita a decir: "Quiero hablar con Júpiter" o "Conécteme a Voyager". Desde mayo de 1997 Júpiter se las ha visto con más de 30.000 llamadas, alcanzando una correcta comprensión de las preguntas de usuarios primerizos en un 80 por ciento de los casos. Las llamadas se graban y evalúan para mejorar las prestaciones del sistema.

El reconocimiento del habla constituiría una interfaz ideal para los dispositivos de mano que se están desarrollando en el marco del proyecto Oxygen. El uso de la voz para dar órdenes proporcionaría mucha mayor movilidad (no habría necesidad de incorporar un voluminoso teclado en la unidad portátil). Y el lenguaje hablado permitiría una eficaz comunicación entre el usuario y los aparatos. Un ejecutivo que va de viaje podría decirle a su ordenador: "Avísame cuando las acciones de Microsoft rebasen los 160 dólares." La máquina procedería de manera muy parecida a un asistente humano, llevando a cabo diversas tareas con instrucciones someras.

Desde luego, aún quedan por afrontar algunos aspectos que hay que investigar. Tenemos que crear aplicaciones de reconocimiento de voz que puedan manejar muchos dominios de información complejos. Los sistemas deben hallarse capacitados para extraer datos de diferentes dominios (del dominio de información meteorológica, por ejemplo, y del dominio de horarios de vuelos), sin que se les indique expresamente. También debemos incrementar el número de lenguajes que las máquinas pueden entender. Y finalmente, para explotar al máximo la interfaz de lenguaje hablado, los sistemas deben ser capaces de hacer más de lo que les *decimos*, deben ejecutar lo que les *queremos decir*. Podemos soñar con que las interfaces del mañana que funcionen con voz permitirán que las máquinas capten las intenciones de los usuarios y respondan en el contexto adecuado. Tales sistemas avanzados no llegarán antes de diez años. Pero una vez que se perfeccionen, formarán parte integrante de la infraestructura de Oxygen.

VICTOR ZUE es director adjunto del Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT cuyo Grupo de Sistemas de Lenguaje Hablado encabeza. Se doctoró en ingeniería eléctrica hace casi veinticinco años.

Camaleones de las comunicaciones

Los sistemas multiusos de comunicaciones se constituirán en enlaces de las redes inalámbricas del futuro

John V. Guttag

Se propone el proyecto Oxygen reemplazar por un solo dispositivo portátil la maraña actual de máquinas y aparatos requeridos en las comunicaciones. Para hacernos una idea, fijémonos en el uso que hacemos del ordenador. No tenemos un ordenador con PowerPoint instalado para componer presentaciones, otro con Eudora para leer el correo electrónico y un tercero con Photoshop para retocar imágenes. Con el único que tengo, paso de una aplicación a otra mediante un simple clic del ratón. De lo mismo se trata en el dominio de los dispositivos que intervienen en comunicaciones. Mi deseo es pasar del teléfono móvil a la agenda electrónica, sintonizar luego mi emisora deportiva y después mi canal de televisión preferido, para, por último, cambiar a mi conexión inalámbrica a Internet. Y lograr todo eso con sólo pulsar un botón.

Handy 21, el ingenio que estamos preparando en el Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT, me lo permitiría. De ajustarse a lo previsto, Handy 21 será un potente ordenador de bolsillo que combinará las funciones del teléfono móvil, la conexión inalámbrica a Internet, la agenda electrónica, la radio AM/FM y el mando a distancia de un televisor. A primera vista, sin embargo, el proyecto parece enfrentarse a un dilema irresoluble: ¿cómo embutir tantas funciones en un útil sin crear un aparato monstruoso con el que no podríamos cargar? Para resolver esa aporía ha nacido SpectrumWare, un proyecto en el que trabaja nuestro centro del MIT.

Con mis compañeros del proyecto he venido desarrollando sistemas multiusos de comunicaciones que pueden programarse para recibir y transmitir tipos diferentes de señales. Son auténticos “camaleones de las comunicaciones”, porque cambian y se adaptan a las necesidades del usuario. Si éste quiere llamar a un amigo, le dará instrucciones al sistema para que se convierta en teléfono móvil. Si desea navegar por la Red, se servirá del mismo dispositivo para acceder a Internet y descargar datos. La clave de semejante flexibilidad del sistema reside en los programas, en el software. Un camaleón de las comunicaciones es una unidad de función general, enlazada con una amplia gama de aplicaciones especializadas. Tales sistemas nos trasladarán a una nueva era de comunicaciones inalámbricas.

Para crear un camaleón, hay que sustituir soporte físico por soporte lógico, hardware por software. Dos alumnos míos de doctorado, Vanu Bose y Matt Welborn, han diseñado un receptor de radio peculiar: consiste en un programa de ordenador escrito en lenguaje C++. Si se compila el código y se ejecuta en un ordenador personal dotado de una antena y un dispositivo muestreador de banda ancha (básicamente, un sintonizador que devuelve una porción del espectro digitalizada), oiremos la canción del verano o la información del tráfico, lo mismo que en un receptor tradicional. Si no nos place el programa merced al cual tenemos una radio, podemos transformarlo en un dispositivo distinto con sólo ejecutar una aplicación diferente. Otro doctorando, John Ankcorn, ha construido un televisor singular: un programa que, además, se ejecuta con el mismo soporte físico que el empleado en el receptor informático de Bose y Welborn.

Señales informáticas

En el programa para oír la radio, trasladamos las fronteras entre lo analógico y lo digital, y entre circuitería y programas, al mismo punto, el más próximo a la antena que no es posible. El soporte físico nos permite seleccionar un segmento cualquiera de 10 megahertz del espectro, convertirlo a una frecuencia media y enviar entonces la señal a la memoria RAM de un ordenador personal. Todo el procesamiento de la señal se realiza en un microprocesador de uso general, con un sistema operativo corriente. Procesar la señal en la misma memoria que utilizan las aplicaciones posibilita que el usuario cree una gama amplia de dispositivos de comunicación (teléfonos móviles universales, interfaces sin cables para conectarse en red y cosas por el estilo) mediante la simple ejecución, en su ordenador, de las aplicaciones indicadas. Puesto que el sistema precisa pocas piezas y materiales específicos, su renovación es fácil. Para acelerar el programa de radio, y así poder sintonizar varias emisoras y grabar todas las señales, basta con cargarlo en un PC más rápido.

Con tamaña máquina, la gente conectaría aparatos de comunicaciones que, hoy por hoy, son incompatibles; por ejemplo, teléfonos celulares digitales y analógicos. Los usuarios podrían configurar el sistema para trabajar al modo de los viejos paneles de conexiones de las oficinas, cuando se descolgaba el teléfono, se solicitaba hablar con Fulano y la operadora de la centralita establecía la conexión. Los nuevos sistemas inalámbricos ofrecerían idéntico servicio, sin limitarse a las personas que se hallaran cerca de un auricular. Podría accederse a la red con un radiotransmisor barato y decir: “Conéctame con mi madre.” El sistema le conectaría entonces con la radio del camión de gran tonelaje en el que su madre corre a toda velocidad por la autopista.

Aunque nos hemos centrado en aparatos de comunicación a través de la voz, pueden aprovecharse esos sistemas para transmitir datos. Con una pequeña dosis de reprogramación, podríamos servirnos del mismo material para construir dispositivos médicos portátiles que enviaran y recibieran registros de ultrasonidos o señales de electrocardiogramas. Los médicos que llevaran estos aparatos tendrían un acceso instantáneo al historial de sus pacientes y a los resultados de las pruebas, aun cuando anduvieran lejos de su despacho.



EL DISPOSITIVO "HANDY 21" que se está desarrollando en el Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT incorporará las funciones de diversos aparatos de comunicaciones, incluyendo (*de izquierda a derecha*) el mando de un televisor, una agenda electrónica, una radio AM/FM, un teléfono móvil y una conexión inalámbrica a Internet. El dispositivo estará equipado con una antena para transmitir y recibir señales de comunicaciones, pero el procesamiento de la señal se realizará en un microprocesador de uso general, que permitirá ejecutar muchas aplicaciones.

Camaleones y Oxygen

Esperamos que los camaleones de las comunicaciones que operen con SpectrumWare constituyan la base de la infraestructura de comunicaciones inalámbricas contemplada en el proyecto Oxygen. En una red inalámbrica con muchos dispositivos móviles —como la red que conectaría las unidades Handy 21— las condiciones de los canales tienden a variar a lo largo del tiempo y son difíciles de predecir. Además, la ejecución de distintas aplicaciones a través de una red introduce una considerable variabilidad en el ancho de banda, la tasa de error y la seguridad que se solicita. Una aplicación para el comercio electrónico puede requerir una criptografía más robusta en su señal de comunicaciones que la de un receptor de radio o de televisión. Las interfaces de red tradicionales son fijas; están diseñadas para operar bajo las peores condiciones que puedan tolerarse, en vez de adaptarse a las condiciones con las que realmente se encuentra el sistema. A menudo, eso significa un derroche de espectro y potencia.

Una red inalámbrica basada en la técnica de SpectrumWare permitiría una organización mucho más dinámica de los recursos. Como las características de todas las capas de comunicación están definidas por programas, pueden cambiarse en cualquier momento. Una estación emisora podría modificar los canales de la red inalámbrica en función del número de unidades móviles en su área de cobertura y sus servidumbres particulares. A las unidades móviles que necesitaran servicios en tiempo real o un gran caudal en el intercambio de datos se les podría asignar un canal dedicado y adaptado a su aplicación, mientras que otras unidades con menor tasa de intercambio de datos podrían quedar asignadas a un canal compartido.

El proyecto SpectrumWare ya ha demostrado la utilidad de los camaleones de las comunicaciones; nuestro empeño se centra ahora en crear aplicaciones prácticas que puedan incorporarse en las redes del futuro. Nos regimos siempre por tres criterios básicos: primero, construir aparatos de uso general en vez de dispositivos especializados; segundo, diseñar sistemas de comunicaciones que puedan optimizarse dinámicamente para el caso con el que se encuentren, y no para el peor de los casos posibles, ni siquiera para el promedio; por último, siempre que sea posible, diseñar sistemas con programas informáticos, no con circuitos materiales. Por fortuna para nosotros, no suele haber impedimento mayor para lo postrero.

JOHN V. GUTTAG dirige el departamento de ingeniería eléctrica e informática del MIT. Allí encabeza también el grupo de sistemas y dispositivos informáticos del Laboratorio de Ciencias de Cómputo.

Computación Raw

Uno de los principales motores del proyecto Oxygen es el microprocesador Raw, cuyas conexiones internas se reprograman de manera automática en razón de la tarea a ejecutar

Anant Agarwal

El proyecto Oxygen se funda en la premisa de que la computación acabará siendo un bien abundante, como el aire. A tal fin será necesario, sin embargo, que las ciencias de cómputo, el diseño de programas y la ingeniería eléctrica se replanteen la arquitectura básica que subyace bajo los sistemas informáticos actuales. El autor y demás miembros del proyecto Raw vienen desarrollando, en el Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT, un microprocesador de nuevo cuño, destinado al proyecto Oxygen. El "chip Raw", así lo hemos bautizado, ofrecerá, a bajo costo específico y merced a la versatilidad de su diseño, prestaciones y economía energética sin precedentes. Por abrir a los programas su conexionado interno, el microcircuito puede ser modificado y adaptado de forma específica a las demandas de la aplicación en curso.

La imparable miniaturización de los microprocesadores ha abierto el camino para nuestro chip Raw. En 1987, un microprocesador contaba con unos 100.000 transistores, era capaz de unas 20 MIPS (millones de instrucciones por segundo) y venía a ocupar un centímetro cuadrado de silicio. Pero en 1997, la misma potencia computacional se podía alojar en cosa de un milímetro cuadrado. Y en el año 2007, un microprocesador de 20 MIPS cabrá en un puntito de una décima de milímetro de lado, diez mil veces menos que en 1987. Está dando comienzo una era en la que cada microcircuito contará con miles de millones de transistores. Ante nosotros se ofrece una ocasión maravillosa.

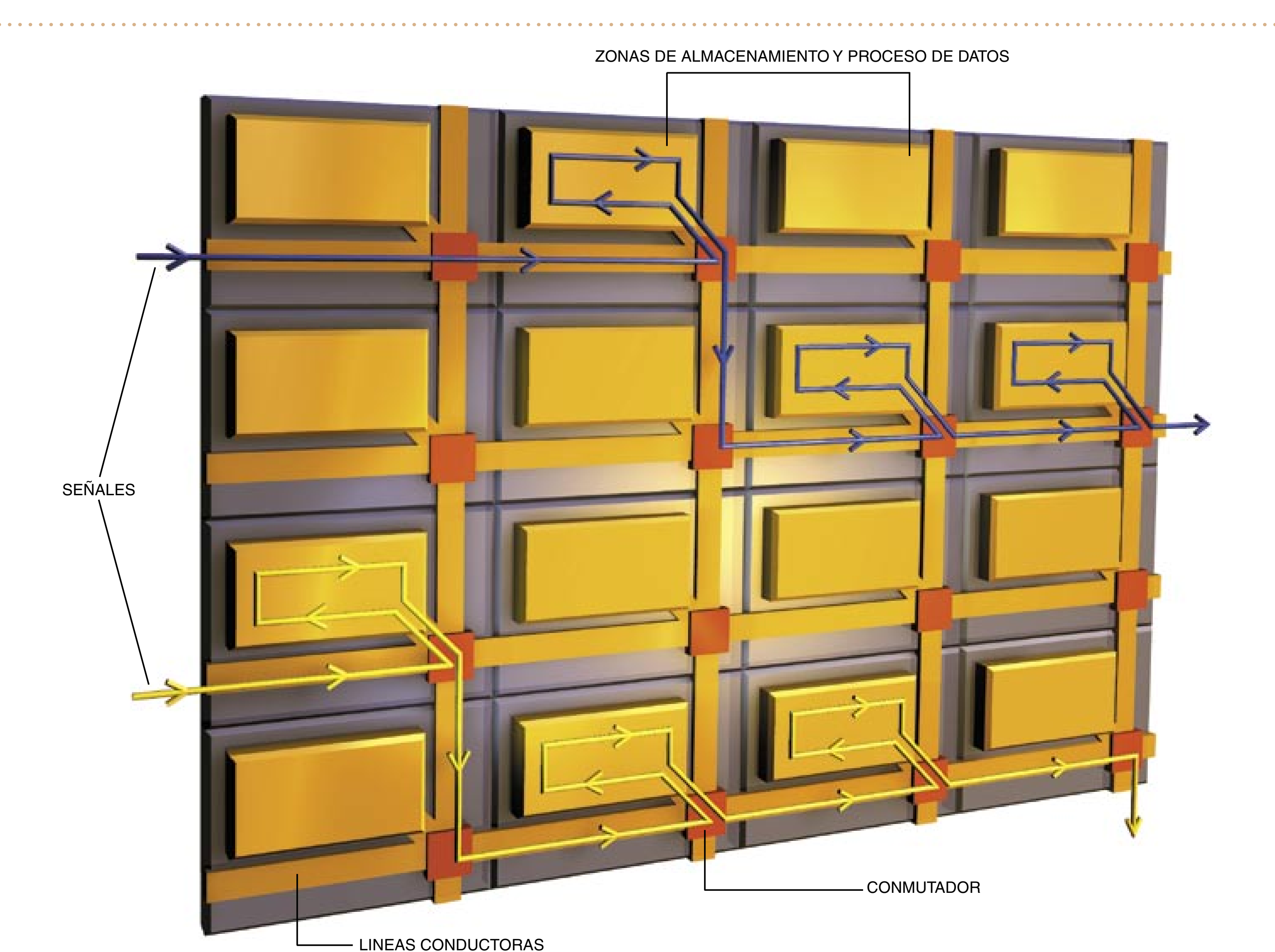
Podemos, claro, desperdiciarla. Una forma de hacerlo sería empeñarnos en seguir perfeccionando las técnicas y arquitecturas de nuestros microcircuitos por el camino de siempre; en construir microprocesadores que sean meras versiones más complejas de los construidos hoy. La dificultad es que la actual arquitectura de los microprocesadores no admite reducción de escala. La mayoría de los ordenadores personales se valen, para la interacción entre los programas y los elementos materiales, de una interfaz llamada ISA, un conjunto básico de instrucciones sobre el cual se edifican los programas. Las instrucciones de ISA trasladan datos desde las posiciones de almacenamiento del microprocesador hasta las unidades funcionales, en las cuales los datos son sumados, multiplicados o procesados de la forma que convenga. Una instrucción, por ejemplo, podría ser del estilo: "SUMA, Registro 8, Posición de memoria 1024, Registro 7." Esta instrucción ordena al microprocesador que sume el contenido del Registro 8 con el contenido de la posición 1024 de la memoria, y que guarde en el Registro 7 la suma obtenida. Pero la mayoría de los sistemas de instrucciones no informan a los programas de las ubicaciones del procesador donde residen las unidades funcionales o las posiciones de memoria, por lo que los microprocesadores actuales han de utilizar elementos materiales —por ejemplo, sistemas de hilos conductores, llamados "barras" o "buses"— para conectar cada posición de memoria con cada unidad funcional.

La reducción incesante del tamaño de los transistores permitirá embutir en cada microprocesador un número mayor de funciones y de posiciones de memoria. Al ser los transistores de menor tamaño, se podrá también reducir la duración del ciclo de reloj del microcircuito, o sea, el tiempo de ejecución de las operaciones básicas, como la adición. Pero, dado que la arquitectura actual exige que las líneas conductoras del chip conecten cada posición de memoria con cada unidad funcional, las longitudes de las líneas seguirán siendo proporcionales al diámetro del chip, y no disminuirán a la par que el ciclo de reloj. Las demoras inherentes a la traslación de datos por esas líneas irán cobrando importancia creciente y, en definitiva, imponiendo límites al rendimiento del dispositivo. La arquitectura al uso producirá también procesadores energéticamente menos eficientes; cuanto más largos los hilos, mayor es la energía necesaria para la conmutación de las señales.

Esquivar el problema

Se podría argumentar que en lo tocante a la complejidad, la velocidad y la eficiencia energética de las arquitecturas existentes hemos chocado contra un muro. Cada ordenador personal lleva en su interior un microprocesador; mas, para sacar pleno partido al equipo, es necesario adquirir un módem, una tarjeta gráfica, un coprocesador matemático, tarjetas de captación de vídeo o de recepción de radio, entre otros aditamentos. Para acomodar a esta baraja de tarjetas especializadas, nuestro ordenador personal ha de ocupar una gran caja. Una vez instaladas, el sistema, en su conjunto, logra ofrecer prestaciones adecuadas para diversas aplicaciones multimedios.

Pero, ¿cómo logran estas tarjetas especiales proporcionar las prestaciones necesarias? Algún proyectista ha diseñado artesanalmente, con el mayor cuidado, las conexiones de los chips de las tarjetas destinadas a cada aplicación concreta, vídeo, radio y demás. Los expertos han ajustado "a mano" las conexiones, para adaptarlas a las necesidades de la aplicación, confeccionando los circuitos, por así decirlo, "a la medida", con el fin de que las conexiones tengan la mínima longitud posible

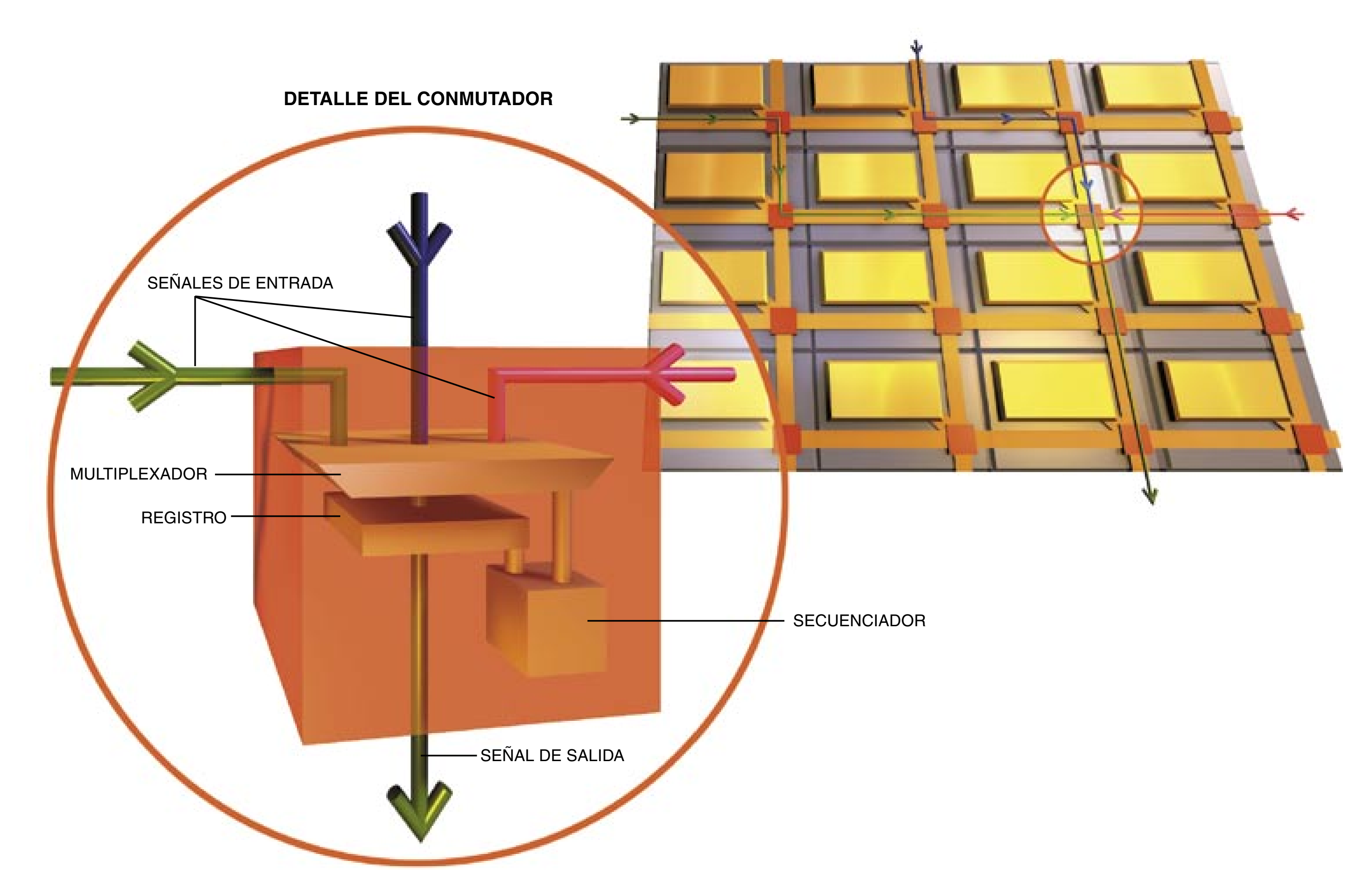


1. UN MICROPROCESADOR RAW consiste en un mosaico rectangular compuesto por losetas idénticas. (En la ilustración sólo se ve una pequeña porción del chip.) Cada loseta contiene posiciones de memoria, para almacenamiento de datos, y unidades funcionales, donde procesarlos. Las zonas de almacén y de proceso están representadas por rectángulos dorados en las losetas. Las señales fluyen por sistemas de líneas conductoras, que conectan cada loseta con sus vecinas. Sistemas de conmutadores ubicados en los cruces de las líneas encaminan las señales a zonas de proceso de datos o hacia losetas adyacentes. Las rutas que las señales hayan de seguir quedan determinadas por un compilador informático; éste programa los conmutadores a la medida de la aplicación que haya de operar en el dispositivo. El microprocesador puede hacer funcionar simultáneamente varias aplicaciones. Puede, por ejemplo, dirigir un flujo de datos de vídeo (*en azul*) por los canales más idóneos para una aplicación de imagen, e ir conduciendo al mismo tiempo una señal de audio (*en amarillo*) por las sendas más adecuadas para una aplicación de radio.

y todas las señales lleguen desde sus puntos de origen hasta los lugares precisos en los momentos exactos. Tal proceder exige un enorme esfuerzo.

¿Cómo podremos, pues, rodear este muro que impide aumentar el rendimiento de los ordenadores? Nosotros proponemos vencer el problema atacándolo con puertas lógicas. Una puerta lógica es un sistema de transistores que gobierna la ruta de la corriente eléctrica por el interior de un circuito, y por consiguiente, el flujo de información. Dentro de unos diez años, todos los microchips dispondrán de miles de millones de puertas lógicas. Sus diseñadores podrán sacar partido de tal profusión construyendo un compilador, un programa especial que utilice esas puertas para encaminar a conveniencia el flujo de información por los conductores del dispositivo. En vez de obligar a los fabricantes a dedicar tanto tiempo a la minuciosa determinación del conexionado correspondiente a cada aplicación, nosotros vamos a construir un procesador y un compilador que permitan reconfigurar automáticamente tal conexionado. El compilador, un sistema de programas, podrá aceptar aplicaciones escritas en lenguajes legibles por nosotros, como el C o el Java, y trasladarlas directamente a los microcircuitos.

A este nuevo modelo computacional se le ha dado el nombre de computación Raw ("en bruto"), pues somete el dispositivo material, conexionado incluido, a las órdenes del compilador, como si fuese una materia prima. Al utilizar las puertas lógicas libres para encaminar y almacenar las señales que circulan por las líneas del



2. LA MULTIPLEXACION eleva el rendimiento del microprocesador Raw, al encaminar varias señales por un mismo tramo de línea. El compilador programa el dispositivo de modo que las señales converjan en uno de los conmutadores del mosaico de losetas (*a la derecha*). El conmutador contiene un multiplexador y un procesador de secuenciación, programados también por el compilador (*a la izquierda*). El multiplexador selecciona una de las señales entrantes (*en verde*), en función de las necesidades de la aplicación en curso, y la transmite a lo largo de un tramo de línea que lleva hasta una loseta contigua. Durante el siguiente ciclo de reloj, el multiplexador transmite otra señal. (El tramo de línea conductora sólo puede portar una señal en cada ciclo de reloj.) El registro integrado en el conmutador almacena los datos hasta que sea posible transmitir sus señales. La multiplexación incrementa la capacidad de transporte de las líneas, reduciendo en consecuencia las demoras en el desplazamiento de los datos a través del circuito.

microcircuito, el compilador adapta el conexionado a la medida de cada aplicación. Se trata de una quiebra sustancial de las arquitecturas existentes; en éstas los programas controlan las operaciones lógicas del circuito —funciones básicas, como “SUMA” o “RESTA”—, pero no controlan las conexiones. El modelo Raw, por contra, permite la programación del conexionado, el más valioso recurso del dispositivo.

La organización del chip Raw es muy sencilla. En sí, constituye un mosaico con muchas losetas. Las losetas, todas idénticas, contienen unidades de memoria, que son conjuntos de lugares de almacenamiento, y unidades funcionales. Y lo que reviste más interés, cada loseta dispone de un conmutador, que controla las líneas que conectan la loseta con las adyacentes.

A ese conmutador están dedicadas las puertas lógicas sobrantes. El compilador programa los conmutadores de todas las losetas, haciéndolos emitir una secuencia de órdenes que establecen exactamente qué conjunto de líneas se han de conectar en cada ciclo de funcionamiento. Así pues, son el compilador y la programación del sistema los coreógrafos de la danza que los datos describirán por el microcircuito, y lo hacen programando cada uno de los bloques de conmutación. Este encaminamiento de la señal “a la medida” “reconexiona” el chip para cada aplicación.

Para empezar, el compilador “segmenta” el conexionado, esto es, lo divide en tramos, con reservorios en cada extremo, para evitar líneas largas, causantes de demoras. A tal fin, introduce a lo largo de las líneas registros de almacenamiento de datos, fragmentándolas en tramos. Cuando un enlace es segmentado, la señal no está obligada a recorrer en un ciclo de reloj toda la longitud de la línea, sino que avanza sólo un tramo y queda almacenada en un registro. La duración del ciclo de reloj puede ser mucho menor; por ello, la arquitectura Raw permite aumentar la frecuencia del reloj, vale decir, el número de ciclos que el circuito puede realizar en un segundo. Los chips Raw alcanzarán frecuencias del orden de 10 a 15 gigahertz hacia el año

2010; las frecuencias de los microprocesadores actuales rondan los 500 megahertz. Aunque la comunicación de una señal a lo largo de una línea segmentada exigirá múltiples ciclos de reloj, serán muchos los valores de señal —uno por tramo— que podrán viajar simultáneamente por esa línea. Tan pronto como el primer valor de señal alcance su destino, en cada ciclo de reloj irán llegando los valores de señal subsiguientes, aumentando así la capacidad de transporte de la línea.

El compilador procura también ubicar los valores de señal en posiciones de memoria cercanas a las unidades funcionales que habrán de procesar los datos. Se minimiza así el número de ciclos que han de tardar los valores de señal para ser trasladados de una posición a otra.

El paso siguiente nace de la comprensión de que, por constituir las líneas del microprocesador un recurso tan crítico, utilizar un conductor para conectar sólo dos puntos del mismo constituye un despilfarro. Convendría, por contra, "multiplexar" cada tramo de línea, para que pudiera interconectar un gran número de posiciones de almacenamiento y unidades funcionales. Tenemos un símil de la multiplexación en la confluencia en una superautopista de las vías de acceso de varias ciudades. Las señales traídas por las conexiones eferentes llegan a un extremo del tramo; un multiplexador construido con puertas lógicas garantiza que, durante cada ciclo de reloj dado, sólo se transmita una señal por el tramo. El compilador programa los multiplexadores, de manera que éstos seleccionen las señales apropiadas para cada aplicación en los instantes correctos. A la manera en que una superautopista tiene mayor capacidad que una vía secundaria, una línea multiplexada puede transmitir muchas más señales que una ordinaria.

Por último, el compilador encauza las señales por las rutas óptimas, temporizando con precisión las señales para atender los requisitos de la aplicación. Dado que las líneas del circuito están programadas por *software*, nos gusta llamarlas "líneas blandas (*soft*)".

Una de las principales ventajas de este diseño es que permite el acarreo directo de flujos masivos de datos —por ejemplo, información de vídeo o procedente de sensores— hasta las regiones del circuito donde se efectúa la computación. Esta superior velocidad de ingreso de datos generará rendimientos energéticos muy superiores a los actualmente posibles. El chip Raw que estamos construyendo contará con más de 1000 contactos externos de entrada/salida dedicados al flujo de datos, unas 10 veces más que en los microprocesadores de nuestros días.

Con un microprocesador basta

El chip Raw podría incorporarse en un dispositivo capaz de una amplia gama de aplicaciones: encriptación o reconocimiento de voz, juegos o comunicaciones. Hemos dado a este útil, propuesto para el siglo XXI, el nombre de Handy 21. Quien lo utilice podrá decirle al Handy 21, "¡Oye, quiero un teléfono móvil!". El equipo localizaría entonces el programa de configuración adecuado, lo descargaría en sí y dispondría el conexionado del Raw instalado en su interior para conferirle las características de un teléfono celular.

Hoy llevo a cuestas un "busca". Cargo también con un teléfono móvil y un organizador personal. Muy pronto podré librarme de todos esos chismes. Mi Handy 21 podrá bajar los programas de configuración necesarios y asumir las funciones de cualquier aparato que necesite. Handy 21 contendrá un solo Raw y varias interfaces de percepción: cámaras, pequeñas pantallas de vídeo e interfaces de voz, provistas de altavoces y micrófonos. Dispondrá de una antena para las comunicaciones y de un convertidor analógico/digital. El convertidor estará integrado en el propio Raw, por lo que prácticamente todas las funciones para las que ahora estamos adquiriendo equipos especiales se obtendrán mediante configuración directa del conexionado del dispositivo a la medida de las aplicaciones.

Nuestro equipo ha construido ya un compilador capaz de programar directamente aplicaciones en un simulador del chip Raw. Por ejemplo, hemos compilado en un Raw de 128 teselas la emulación de un receptor de radio, mediante un programa que confiere a un ordenador personal la capacidad de funcionar como una radio de FM. Nuestros resultados indican que esta aplicación funcionará unas 10 veces más rápidamente en el Raw que en cualquier microprocesador de corte tradicional. Algunos de nuestros alumnos decuplicaron el rendimiento, traduciendo "a mano" la aplicación, sin ayuda de un compilador. Pero el auténtico problema estriba en desarrollar un compilador capaz de centuplicar el rendimiento, como se logra al ajustar artesanalmente el conexionado del dispositivo a la medida de la aplicación.

Si tuviéramos éxito, el dispositivo Raw podría convertirse en el chip lógico universal, que sustituyera tanto a los microprocesadores de uso general como a los microcircuitos especiales, destinados a funciones específicas. Se podría decir, tal vez exagerando un poco, que dentro de veinte años habrá en el mundo sólo tres clases de chips: chips Raw, chips de memoria y, evidentemente, las patatas "chips".

ANANT AGARWAL es codirector del proyecto Raw en el Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT. Sus campos de investigación son la arquitectura de ordenadores y los sistemas de compilación y de programación. En el proyecto Raw intervienen también Michael Zhang, Michael Taylor, Mark Stephenson, Andras Moritz, Jason Miller, Albert Ma, Walter Lee, Sam Larsen, Jason Kim, Benjamin Greenwald, Matthew Frank, Rajeev Barua, Jonathan Babb y Saman Amarasinghe.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

La página portada del Laboratorio de Ciencias de Cómputo del MIT (www.lcs.mit.edu) ofrece, en extracto, el trabajo de los muchos grupos de investigación que participan en el proyecto Oxygen. En la página del grupo de Sistemas de Lenguajes Hablados (www.sls.lcs.mit.edu/sls/) se dan detalles sobre interfaces dialógicas y sobre las aplicaciones basadas en el habla. Puede hallarse información sobre dispositivos de comunicaciones y sobre redes inalámbricas emulados por programas en la página del proyecto SpectrumWare (www.sds.lcs.mit.edu/SpectrumWare/home.html). En la sede del proyecto Raw (www.cag.lcs.mit.edu/raw/) se da una descripción del microprocesador Raw, así como una lista de publicaciones de los miembros del equipo. Hay también información para entrar en contacto con los investigadores en la sede del laboratorio en la Red (www.lcs.mit.edu/contact/). Para una panorámica del futuro de las técnicas de la información puede verse *What Will Be*, de Michael L. Dertouzos (HarperCollins, 1997).

Shawn Carlson

Secretos de experto para conservar plantas

El jardín botánico o el museo de historia natural que el lector tenga más próximo albergará, sin duda, una colección impresionante de la flora regional. Es rara la ciudad de España e Iberoamérica sin su herbario de plantas locales, un excelente registro tangible que los biólogos presentes y futuros pueden emplear para rastrear el modo en que las especies endémicas se las compusieron para reaccionar ante la presión del entorno y del hombre. Desde siempre, los aficionados desempeñaron un papel clave en la conformación del patrimonio botánico. Llegado el buen tiempo, un ejército de entusiastas recorre las campiñas o asciende a los montes en busca de una flora fascinante.

Para ayudar a los botánicos en ciernes, recordaremos algunas indicaciones sobre la conservación de especímenes. El proceso comienza en el campo. De entrada, fotografiaremos la planta antes de arrancarla para guardar un registro de ella en su emplazamiento natural. En fotocopias de un mapa topográfico señalaremos la ubicación exacta de nuestros hallazgos. Añadiremos esas anotaciones a nuestro cuaderno de campo. Si el ejemplar mide menos de 15 centímetros de altura, lo arrancaremos entero, con todos sus órganos. Si es mayor, cortaremos una porción representativa, donde no falten flores, frutos y algunas vainas, que a menudo nos permiten identificar la especie mejor que las hojas. Etiquetaremos las muestras, una a una. En el cuaderno se anotará el nombre vulgar y la denominación científica de la especie, la fecha de herborización y cualquier otro dato que un futuro botánico pudiera necesitar. Hasta haber acabado la recogida diaria, mantendremos las muestras colgadas boca abajo a la sombra para minimizar el arrugamiento de los tallos cuando la humedad de los tejidos empieza a evaporarse.

Como las plantas cortadas se deterioran rápidamente, hay que tratarlas nada más volver a casa. Se empieza por sumergir cada espécimen en agua tibia y levemente jabonosa; luego, se agita con suavidad en agua limpia para eliminar el jabón. Esta operación mata las bacterias y expulsa las orugas. Séquese a conciencia el follaje por absorción en una toalla de papel.

Para conservar los vegetales, nada más indicado que comprimirlos y desecarlos. Empecemos por colocar tres capas de toallas de papel sobre una plancha rígida que mida unos 30 por 45 centímetros. Luego, con gran cuidado, extenderemos nuestra planta ya limpia asegurándonos de dejar expuestas distintas vistas (haz y envés) de las hojas. Las flores grandes hay que henderlas con un cuchillo afilado y abrirlas dejándolas planas con sus partes internas expuestas. A continuación, encima se colocan tres capas más de toallas de papel, seguidas de una hoja de cartón corrugado y tres capas adicionales de toallas de papel. Extiéndase entonces un segundo espécimen. De este modo apilaremos hasta diez muestras.

Colóquese una segunda plancha rígida encima de la pila y aplíquese una presión uniforme y firme, pero poco a poco, al objeto de expulsar el agua de los tejidos vegetales y que pase al papel absorbente. Empléese un peso o bien cuatro tornillos de encolar situados junto a las esquinas. Si se prefiere, puede emplearse una prensa profesional adquirida en un comercio de artículos de historia natural.





1. Una prensa de factura casera expulsa el agua del tejido de la planta, preservando los especímenes. Las muestras hay que disponerlas entre toallas de papel y cartón corrugado. Con cuatro tornillos en las esquinas se fijan mejor los pliegos (derecha)

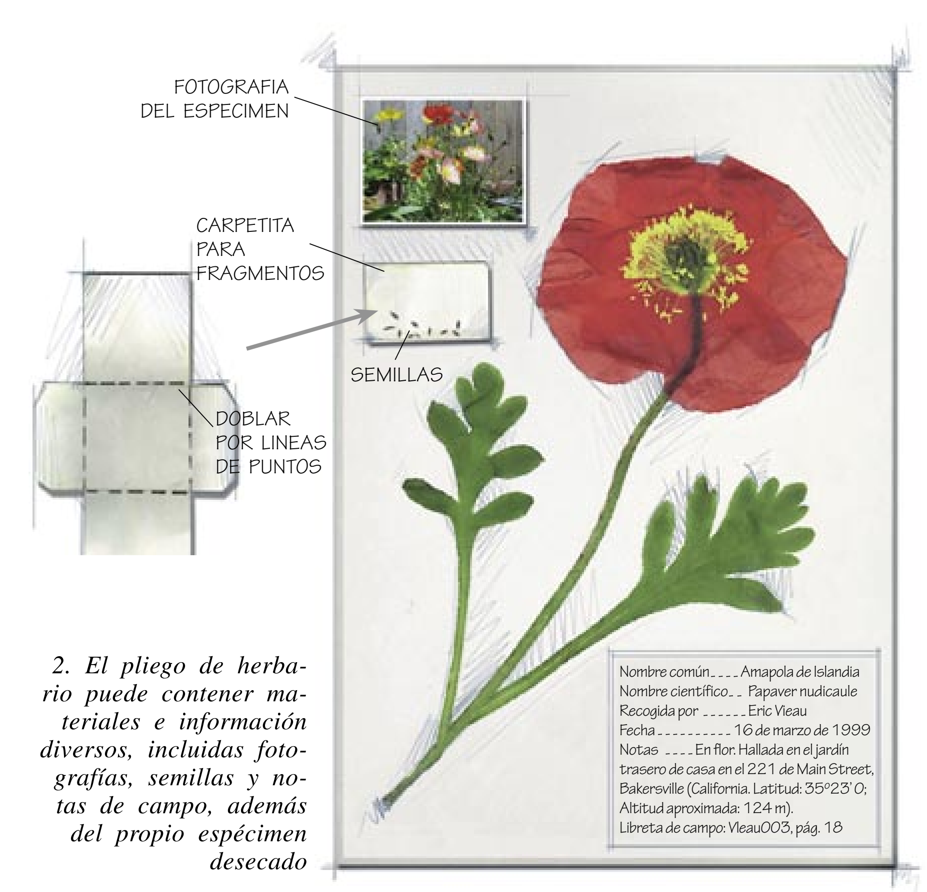
Guárdese la prensa en un alféizar cálido y soleado. Según la cantidad de agua que contengan los especímenes habrá que reponer el papel cada varios días. En la mayoría de los casos basta con cambiar el papel cada dos o tres días, con lo que las muestras se desecan por completo en unas tres semanas. Sin embargo, las hojas más gruesas y carnosas pueden tardar cuatro semanas en desecarse. Seguidamente, para acabar con cualquier parásito obstinado que pueda quedar, introduciremos las plantas desecadas en una bolsa de plástico y enviaremos la colección a un congelador durante tres días al menos.

Los herbolarios de los museos montan sus especímenes en pliegos de cartulina normalizados que miden 29 por 42 centímetros. Las cartulinas ordinarias, aunque menores, dan un resultado perfecto y pueden comprarse en resmas en las tiendas de artículos de oficina. Lo deseable es papel neutro.

Ante la extrema fragilidad de las plantas desecadas, hemos de montarlas con sumo cuidado. Dilúyase un poco de pegamento incoloro con aproximadamente un tercio de agua y úntese una capa fina sobre una bandeja de horno. Recúbrase el reverso de la muestra depositándola suavemente sobre el líquido. Retírese con cuidado la planta, séquese con una hoja de papel de diario y póngase sobre el pliego de herbario. Luego se retocan todas las partes del espécimen para eliminar los excesos de pegamento. Encima se colocan una hoja de papel de cera y un cartón y se emplea la prensa para afianzar el conjunto hasta que se seque el adhesivo.

Aunque mis primeros esfuerzos con el pegamento común incoloro han perdurado sin problemas durante unos 25 años, los profesionales recurren a una mezcla que llaman "pasta botánica". (Si alguien conoce la receta de esa sustancia, por favor que la comparta en la zona de discusión de este proyecto en la dirección de la Web que damos más adelante.)

Traslademos toda la información pertinente acerca de cada espécimen desde nuestra libreta de campo a una etiqueta de papel neutro y peguémosla al pliego de herbario. Las semillas y otras partes sueltas pueden guardarse en sobrecitos de papel que se pegan o grapan al pliego. No nos olvidaremos de incluir las fotos que hayamos tomado, que podremos pegar directamente a los pliegos. Si el viejo refrán no miente, cada imagen podría ahorrarnos mil palabras de texto.



2. El pliego de herbario puede contener materiales e información diversos, incluidas fotografías, semillas y notas de campo, además del propio espécimen desecado

Por último, hay que archivar la colección. Mis muestras las organizo en álbumes de fotos de hojas sueltas que guardo dentro de dos sacos de basura anidados. Los especímenes están contenidos en el saco interior, herméticamente sellado. Junto a la boca del saco interior y dentro del saco exterior coloco un paquete fumigante hecho de bolas antipolilla envueltas en gasa. Reponiendo las bolas antipolilla más o menos cada seis meses se mantiene lejos a los parásitos.

El vivir cerca del mar me ha permitido coleccionar plantas marinas. Pero estos organismos presentan dos dificultades particulares. Primero, una planta que haya sido arrojada a la playa probablemente lleve bastante tiempo muerta y albergue ya unas florecientes colonias bacterianas. Pero las plantas marinas son muy robustas y pueden soportar unas manipulaciones más severas que sus primas terrestres. Así, en cuanto las tengo en casa, las mantengo en agua caliente y muy jabonosa durante 10 minutos para eliminar todas las bacterias.

El segundo problema es más sutil. Tratadas del modo usual, las algas se pudren. Sus tejidos absorben humedad directamente de la atmósfera y, por eso, se mantienen siempre húmedas. Por suerte, la sal puede lixiviarse fácilmente merced a un remojón a fondo en agua destilada. En un barreño échese un peso en agua cincuenta veces superior al de la planta y espérese ocho horas. Luego repítase la misma operación. Añadiendo unas cuantas gotas de lejía cada vez impediremos que nuevas colonias bacterianas se adueñen de la situación mientras la sal se difunde desde las células.

Una vez desinfectadas y lixiviadas a fondo, podemos comprimir las algas como cualquier otra planta. Pero no extenderemos el follaje a mano, sino que trataremos de exponerlo mientras aún flote en el barreño. Con cuidado introduciremos un cartón bajo la planta y, con más cuidado aún, sacaremos a ambos del agua. Así habremos captado el movimiento natural del vegetal y creado un espécimen más bello y realista.

El autor agradece sinceramente las conversaciones informativas con Judy Gibson del Museo de Historia Natural de San Diego. Para más información acerca de este y otros proyectos de Amateur Scientist, visite la página Web en www.thesphere.com/SAS/ WebX.cgi. Puede asimismo escribirse a 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o llamar al 619-239.88.07.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

La ubicua curva de Sierpinski

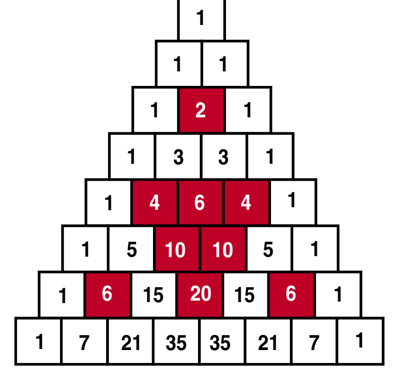
Números extraños, formas extrañas: tales son las cosas que confieren su seducción a las matemáticas. Y más aún, las extrañas vinculaciones que hay en ellas. Cuestiones de apariencia dispar poseen unidad secreta y oculta. Entre mis favoritas está la curva de Sierpinski, la configuración triangular que vemos en la figura 1. Con término acuñado por Benoit B. Mandelbrot, tal configuración es una fractal, esto es, puede dividirse en partes que son versiones reducidas de la configuración total. Pero la curva de Sierpinski guarda también relación con las intersecciones de las curvas consigo mismas, con el triángulo de Pascal, con el juego de la Torre de Hanoi y el curioso número 466/885, cuyo valor numérico es aproximadamente 0,52655. Este número debería figurar, al lado de π, de e, de la razón áurea y de otros similares, en esa lista de "números más importantes de lo que parecen" que todos deberíamos tener.

El matemático polaco Waclaw Sierpinski dio a conocer su curva en 1915. No es difícil dibujar una: se descompone un triángulo equilátero en otros cuatro, uniendo con segmentos los puntos medios de sus lados; se suprime después el triángulo central y se repite el procedimiento con los triángulos subsistentes. Si tal proceso se reiterase un número infinito de veces, el resultado final sería una curva que se corta a sí misma en cada uno de sus puntos, instancia clásica de una propiedad geométrica tan contraria a la intuición que tales configuraciones fueron en un principio denominadas curvas patológicas. Hablando estrictamente, la curva de Sierpinski se corta a sí misma en cada uno de sus puntos, menos en los tres vértices del triángulo máximo inicial. La respuesta de Sierpinski a esta objeción es que, formando un hexágono regular con seis ejemplares del triángulo, el resultado sí es una curva que se corta a sí misma en cada punto. Hasta se han diseñado antenas de radiotelefonía en curva de Sierpinski para sacar partido de su forma dentada.

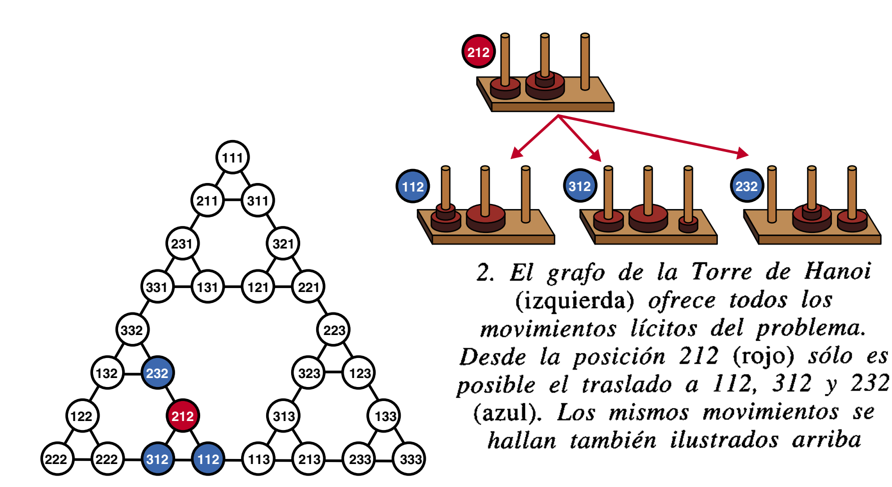
Con anterioridad, en 1890, el matemático francés Edouard Lucas había descubierto un teorema que establece un vínculo entre la curva de Sierpinski y el triángulo de Tartaglia (también llamado triángulo de Pascal); en éste, cada número es la suma de los dos situados sobre él. Estos números reciben nombres más técnicos, a saber, números combinatorios, o coeficientes binomiales, y el k-ésimo elemento de la fila n (siendo contadas filas y elementos a partir de 0, y no de 1, como es habitual) dice el número de las distintas formas en que se pueden seleccionar k objetos de entre una colección de n. Lucas preguntóse: ¿en qué casos son pares, y cuáles, impares, los números del triángulo de Tartaglia? Los resultados, presentados en la ilustración, chocan y sorprenden. La disposición de los coeficientes binomiales impares se asemeja notablemente a una versión discreta de la curva de Sierpinski.

Una consecuencia curiosa es que casi todos los coeficientes binomiales son pares; esto es: conforme se va haciendo mayor el tamaño del triángulo de Tartaglia, la razón del número de coeficientes impares al de coeficientes pares está cada vez más próxima a cero. El motivo estriba en que, constituyendo la figura de Sierpinski una curva, su área, que representa en el límite la proporción de coeficientes binomiales impares, es cero. David Singmaster ha profundizado en esta observación, demostrando que, para cada m, casi todos los coeficientes binomiales son divisibles por m.

Lucas parece haber quedado hechizado, aun sin saberlo, por la curva de Sierpinski. En 1883 puso a la venta el famoso rompecabezas conocido por la Torre de Hanoi bajo el seudónimo de "M. Claus" (el apellido es anagrama del suyo). El rompecabezas consta de ocho (o menos) discos insertables en tres varillas —en la figura 2 se muestra el caso de tres discos— y es uno de los problemas favoritos de las matemáticas recreativas. Los discos se encuentran insertos en una varilla, dispuestos de mayor a menor, y han de ir moviéndose de uno en uno, de suerte que ninguno descanse sobre otro disco de diámetro menor. El propósito del



1. La curva de Sierpinski se obtiene por división y subdivisión de un triángulo equilátero (izquierda). *Los números impares del triángulo de Tartaglia* (arriba) *siguen una pauta similar*



2. El grafo de la Torre de Hanoi (izquierda) *ofrece todos los movimientos lícitos del problema. Desde la posición 212* (rojo) *sólo es posible el traslado a 112, 312 y 232* (azul). *Los mismos movimientos se hallan también ilustrados arriba*

rompecabezas es trasladar todos los discos desde el vástago en que se encuentran hasta otro distinto.

Es bien sabido que la solución tiene estructura recursiva. Es decir, que la solución de la Torre de Hanoi de $(n+1)$ discos puede ser fácilmente deducida de la solución correspondiente a n discos. Supongamos, por ejemplo, que sabemos resolver el problema con tres discos, y que nos plantean la variante de cuatro. Empecemos despreciando el disco mayor, situado en lo bajo, y apliquemos nuestro saber para transferir los tres discos superiores hasta otra varilla. Llevemos entonces el disco grande hasta la varilla libre restante. Y ahora, volvamos a servirnos de la solución conocida en el caso de tres para trasladar los tres discos menores hasta esa varilla, superpuestos al disco grande.

Cabe interpretar geométricamente esta estructura recursiva, y aquí es donde entra en juego el vínculo con la curva de Sierpinski. En todo problema de esta categoría general, basado en objetos desplazables que ocupan un número finito de posiciones, se puede dibujar un grafo: una colección de nodos (puntos gruesos) unidos por lados (segmentos). En un grafo de la Torre de Hanoi, los nodos corresponden a las posiciones posibles de los discos que son lícitas; los lados, a los movimientos lícitos de una posición a otra. Llamemos H_n al grafo asociado al problema de n discos. ¿Qué aspecto ofrece? Examinemos el caso particular H_3, que describe las posiciones y movimientos del Hanoi con tres discos. Numeremos los discos 1, 2 y 3, siendo 1 el menor y 3 el mayor. Numeremos también 1, 2 y 3 las varillas, de izquierda a derecha. Admitamos que el disco 1 se encuentra en la varilla 2, el disco 2 en la varilla 1, y el disco 3, en la 2. Las reglas implican que el disco 3 ha de encontrase debajo del disco 1. Podemos, pues, representar esta posición del juego por la secuencia 212, cuyas cifras, a su vez, representan las varillas ocupadas por los discos 1, 2 y 3. Cada posición del Hanoi con tres discos se corresponde con una secuencia similar. Existen $3^3 = 27$ posiciones, porque cada disco puede hallarse en cualquier varilla, independientemente de los otros.

¿Cuáles son los movimientos lícitos desde la posición 212? En cada varilla, el disco menor ha de estar en lo alto; no podemos, por ejemplo, llevar el disco 2 a la varilla 2, porque entonces yacería sobre el disco 1, que es menor. Desde la posición 212 solamente es lícito pasar a las posiciones 112, 312 y 232. En el grafo H_3 se muestran todos los movimientos lícitos desde cada una de las 27 posiciones. El grafo consiste en tres copias de un grafo menor, H_2, enlazados por tres lados, formando un triángulo.

Cada uno de los grafos menores H_2, tiene una estructura triple similar, consecuencia del carácter recursivo de la solución. Los lados que conectan entre sí los tres ejemplares de H_2 representan las formas de mover sólo los dos discos situados en lo alto: una copia para cada posible posición del tercer disco. Otro tanto vale para cualquier H_n: está constituido por tres copias de H_{n-1}, conectadas de forma triangular. Conforme va aumentando el número de discos, el grafo se va pareciendo cada vez más a la curva de Sierpinski.

Podemos servirnos del grafo H_n para responder a toda clase de cuestiones sobre el problema de la Torre de Hanoi. Por ejemplo, es obvio que se trata de un grafo conexo —esto es, de una sola pieza—, por lo que podemos pasar desde cualquier posición a cualquier otra. El camino mínimo que lleva desde la posición de partida habitual (uno de los vértices del triángulo grande) hasta la posición final habitual (otro de los vértices) corre directamente a lo largo de uno de los lados de grafo, y consta de $2^n - 1$ lados. Por tanto, el problema puede ser resuelto en $2^n - 1$ movimientos, y éste es el número mínimo.

Hará unos diez años, Andreas Hinz se sirvió de la Torre de Hanoi para calcular la distancia media entre dos puntos de una curva de Sierpinski. Hinz demostró que, para la torre de n discos, el número medio de movimientos que conectan dos posiciones cualesquiera tiende hacia $(466/885)2^n$ cuando n toma valores grandes. Este resultado entraña que la distancia media entre dos puntos de una curva de Sierpinski es 466/885, si cada lado tiene longitud 1. (Basta multiplicar el número medio de movimientos por la longitud de cada lado, que es $1/(2^n - 1)$. El producto tiende hacia 466/885 cuando n tiende a infinito.) Hinz demostró también que la varianza de la distancia entre dos puntos tomados al azar en la curva de Sierpinski de lado unidad es exactamente 904808318/14448151575. ¡Incluya este valor en la lista de números que significan más de lo que parecen!

Acuse de recibo

En el Acuse de recibo que acompañaba a "¡Retorcida topología!" [junio] declaraba yo que habían desaparecido mis vagos recelos sobre los algoritmos de cuchillo móvil para el reparto de tartas. Steven J. Brams me ha escrito, haciendo notar que mis iniciales reservas no son tan fáciles de eliminar. Brams, Alan D. Taylor y William S. Zwicker han analizado los métodos de cuchillo móvil en "A Moving-Knife Solution to the Four-Person Envy-Free Cake-Division Problem" (*Proceedings of the American Mathematical Society*, febrero de 1997). Describen en él una metodología para un reparto sin envidias entre cuatro jugadores que requiere un máximo de 11 tajos. En el caso de cuatro jugadores, no se conoce ningún procedimiento discreto con número acotado de cortes y es probable que no existan tales procedimientos. Desde luego, el procedimiento de los citados no puede ser discretizado señalando "marcas" en la tarta. La reducción de los métodos de cuchillo móvil a marcas funciona en ciertos casos... pero no en todos. —*I.S.*

NEXOS

James Burke

Cuestión de oído

Hace poco padecí una infección de oído. Algo sin importancia, pero suficiente para perder transitoriamente la capacidad de identificar el origen de los sonidos. Al hilo de eso me vino a la memoria la manera en que durante la Segunda Guerra Mundial se identificaba la trayectoria de los cohetes V2 (que quien ya sabemos dirigía contra mí, esto es, contra Londres). La artillería antiaérea británica descubría la trayectoria recorrida mediante una serie de micrófonos separados entre sí, cada uno de los cuales recogía el sonido con mínimas diferencias de tiempo, para triangular el sonido de las explosiones. Participó en este despliegue Lawrence Bragg, el premio Nobel más joven de la historia. Pasó parte de la Primera Guerra Mundial aplicado a esta técnica de fonolocalización, merced a la cual la posición de la artillería enemiga quedaba clara como el cristal.

Que es precisamente por lo que Bragg recibiría el Nobel: por los cristales. En el verano de 1912, junto con su padre, otro premio Nobel, ideó un método para identificar la composición de los cristales mediante el rebote de los rayos X en la red atómica. Conforme los rayos se reflejaban (expresión de Bragg) de la línea de átomos, interaccionaban entre sí y producían patrones de interferencia característicos que revelaban la disposición de los átomos y la composición del cristal.

La técnica básica la acababa de desarrollar un poco antes el alemán von Laue, cuando buscaba demostrar que los rayos X eran ondas electromagnéticas muy cortas (por lo que deberían interaccionar si rebotaban en minucias atómicas). Von Laue obtuvo la representación visible de los patrones de interferencia mediante la exposición de una placa fotográfica a los mismos. El resultado son los famosos diagramas de Laue. La inspiración de estas cosillas la encontramos en un clérigo del que nos hemos ocupado en alguna ocasión, René-Just Haüy. Cierto día en que se encontraba comentando un pedazo de calcita con un colega, se le cayó y descubrió con estupefacción que los fragmentos se parecían todos entre sí. Ni corto ni perezoso fue en busca de su martillo y se puso a hacer añicos cuantos cristales halló. Así pudo afirmar que hasta "las últimas partículas" (según su forma de hablar) de cualquier tipo de cristal tenían la misma forma. En el caso de la calcita se trataba de romboedros (imagino que el lector ya lo sabía). En 1801 Haüy sacó a la luz el tomo obligado donde se establecía la ciencia de la cristalografía y describía seis formas básicas de cristales.

Un investigador alemán se tomó las nuevas a pecho. Friedrich Mohs opinó en 1822 que las formas básicas no eran seis, sino cuatro. Su opinión en el asunto había madurado mientras trabajaba duro en algo que cuesta evitar cuando una dama quiere saber si su amante es un fraude. Debemos a Mohs, y a eso estoy aludiendo, saber que el diamante puede rayar cualquier material menos duro. Le debemos también la "escala de dureza de Mohs", acorde con la cual ordenó la dureza de diez materiales, del talco (1) al diamante (10). (Algunas adiciones posteriores incluyeron, por extrañas razones, las uñas.) Su familiaridad con las piedras preciosas le franqueó el acceso a los poderosos. Llegó a consejero del ministro de hacienda imperial.

En 1825 Mohs recibió la visita de un británico que aspiraba a una futura vacante de profesor de mineralogía. Conseguiría el trabajo. En 1841 llegaría además a vicecanciller de Cambridge. Y desde esa posición modernizaría el programa de estudios. Se llamaba William Whewell y le tengo especial aprecio porque se dedicó a divulgar la ciencia y buscar *nexos* ciento cincuenta años antes de que inaugurásemos la sección. Whewell fue prototipo de victorianos: experto en mareas, matemático, poeta en hexámetros, traductor del alemán, profesor de griego e inventor de las palabras "ion", "ánodo", "cátodo", "físico" y "científico". También repudió el arco ojival en favor del arbotante como principio definidor de la arquitectura gótica. Y se dice que, de no haber llevado sotana, hubiera sido un magnífico boxeador. Whewell organizó la comunidad científica inglesa, convirtiéndose en el personaje imprescindible.



De niño recibió clases del "filósofo ciego" John Gough, en el Distrito del Lago, en Inglaterra, de donde provenía Whewell. Gough se desenvolvía bastante bien en matemáticas y en botánica. Para reconocer las plantas se las pasaba por los labios y la lengua; desarrolló una teoría matemática sobre la trompeta parlante, estudió ventriloquia y, como un eco del tema introductorio,

investigó la “posición de los objetos sonoros”. Wordsworth y Coleridge opinaron que Gough sobrellevó muy bien su aflicción. Tenía verdadera pasión por la meteorología, que pasó a un discípulo suyo, John Dalton, que llegó a hacer más de 200.000 observaciones meteorológicas diarias. En 1844 Dalton se cayó de la cama y murió. El registro de aquel día fue anodino: “Ha llovido poco”. Tantos años dedicados a contemplar el comportamiento del agua en la atmósfera le llevaron de forma natural a interesarse por el comportamiento del aire (o del cualquier gas) en el agua. Realizó diversos experimentos en los que aumentaba la presión para forzar la mezcla de gases con el agua. A raíz de estos ensayos, en 1803 propuso que las partículas “ligeras, simples” de gas se absorbían en agua con mayor dificultad que las partículas “pesadas, complejas”. La lista de partículas ligeras y pesadas que incluyó al final del artículo es la primera versión conocida de la tabla de los pesos atómicos.

En 1792, Dalton fue nombrado profesor del Colegio Unitarista de Manchester, que se abrió después de la desaparición de la Academia de disidentes Warrington, en la que había enseñado Joseph Priestley antes de que le sucediera Reinhold Forster. De 1772 a 1775 Reinhold y su hijo Georg fueron los naturalistas del *Resolution*, barco en el que el capitán Cook se aventuró en busca de un hipotético continente austral. Cuando regresaron, obsequiaron a Cook con un libro sobre el viaje que los puso en pésimas relaciones con el estamento naval, hasta el punto de que Georg no tuvo más remedio que marchar a Alemania.

A lo largo de 1790 descendió el Rin junto a Alexander von Humboldt en un viaje de tres meses; probablemente los amenizó con historias de naturalistas de los días y las noches de la expedición de Cook. No se sabe si Humboldt llegó a tomar notas o no, pero lo cierto es que en sus viajes por Sudamérica hizo cosas muy parecidas a las de los Forster en el Pacífico.

Los escritos de Humboldt llegaron a un inquieto geógrafo y escritor de viajes, Friedrich Ratzel, quien, a su paso por los Estados Unidos, se ocupó de la menguante población de americanos nativos. En 1901 postuló la teoría de que la población se relacionaba de forma directa con el espacio: a más espacio, más población. En 1921, Karl Haushofer, profesor de geopolítica de Munich, enseñaba estas teorías a sus hacinados alumnos. Dos años más tarde visitó a un ex alumno que casualmente compartía celda con alguien que estaba escribiendo grandes ideas y que acogió con entusiasmo la teoría demográfica del *Lebensraum*, porque se adaptaba perfectamente a su propia concepción de lo que debería ser el futuro de Alemania en el concierto de las naciones. El ex alumno de Haushofer se llamaba Rudolf Hess y su compañero de celda se encargaría más tarde de enviar los misiles V2 que mencionaba al principio de la sección: Adolf Hitler.

Que también tenía un problema de oído, me parece recordar.

Miscelánea

Ciencia divertida

LES MILLE ET UNE NUITS DE LA SCIENCE, por Philippe Boulanger. Éditions Belin; París, 1998.

Son las misceláneas género poco habitual en nuestros días; si son sus miras la información científica, suponen, me parece, una innovación. De ese juego y de ese propósito —no lo hay más difícil— ha disfrutado Philippe Boulanger.

Boulanger, espigando entre lo más extraño y más maravilloso de la ciencia moderna (que supera, por fantástico, cuanto la imaginación de los antiguos fabulistas haya podido concebir, sobre todo en matemáticas y en física), añade algunas noches (cincuenta y una, exactamente) al célebre e imperecedero clásico llegado del mundo musulmán.

Entre los temas que se abordan y exponen en los cuentos encontramos una introducción a la criptografía y a las extravagancias de la codificación: Chahmazane explica a Yatagan que eligiendo adecuadamente la anchura y la altura de un rectángulo podemos alojar en él una biblioteca entera, y para mayor sorpresa todavía, que en los decimales del número pi (y por lo tanto, en un círculo cualquiera) están ya todos libros escritos y todos los que lo serán.

La ralentización relativista del tiempo en las cercanías de la velocidad de la luz es materia ideal para un cuento fantástico. La paleontología, las paradojas de las votaciones, la vida no poco chocante de los simios bonobos (pero que tanto nos dice de nosotros mismos), los razonamientos lógicos o probabilísticos, las fractales, las variaciones del clima, la teoría de nudos, el dilema del preso, son otros tantos temas que permiten al autor proporcionarnos entretenimiento e instrucción.

La obra constituye una pequeña enciclopedia de hechos asombrosos de la verdad científica que todos deberíamos conocer. Boulanger nos hace sentir cuánto se distancia a veces la ciencia del sentido común dando ocasión a una multitud varia de misterios, enigmas y desconciertos sobre los que están urdidos los relatos. El mundo que la ciencia nos revela es, a fin de cuentas, más increíble que el ofrecido en las historias originales de *Las mil y una noches*. La idea de construir cuentos a partir de la realidad cual es desvelada por las ciencias era ciertamente tentadora.

JEAN-PAUL DELAHAYE

Vida

Ciencia y filosofía

GENESI DI UNA TEORIA SCIENTIFICA, por Antonio Caddedu. Cooperativa Universitaria Editrice Cagliaritana; Cagliari, 1998.

DESCARTES'KONZEPTION DES SYSTEMS DER PHILOSOPHIE, por Reinhard Lauth. Frommann-Holzboog; Stuttgart-Bad Cannstatt, 1998. **NEUROFISIOLOGIA CARTESIANA,** por Franco Aurelio Meschini. Leo S. Olschki; Florencia, 1998. **BUFFON,** por Jacques Roger. Cornell University Press; Itaca, 1997. **JEAN-BAPTISTE LAMARCK, 1744-1829.** Bajo la dirección de Goulven Laurent. Editions du CTHS; París, 1997.

THE MOLECULAR ORIGINS OF LIFE. ASSEMBLING PIECES OF THE PUZZLE. Dirigido por André Brack. Cambridge University Press; Cambridge, 1998.

THE LIMITS OF REDUCTIONISM IN BIOLOGY. Edición preparada por Gregoy R. Bock y Jamie A. Goode. John Wiley and Sons; Nueva York, 1998. **GENETICS AND REDUCTIONISM,** por Sahotra Sarkar. Cambridge University Press; Cambridge, 1998.

Todas las formas de materia, inerte o viva, se rigen por las mismas leyes físicas. Pero los organismos poseen una complejidad y dinamismo exclusivos, muy alejados de la estructura sencilla, cristalina en el mejor de los casos, de los compuestos inorgánicos. Además, se autorreplican y, en los niveles superiores, poseen voluntad libre. Aunque sólo ahora sabemos que la emergencia de la vida está asociada a la consecución de una corteza sólida en la Tierra, en todas las civilizaciones el hombre ha expresado su interés por conocer la raíz última de su existencia y de cuanto alienta a su alrededor. La teoría de la generación espontánea pareció aportar una respuesta a esa cuestión perdurable. Su avatar histórico se recorre a grandes zancadas en *Genesi di una Teoria Scientifica*, con el punto de mira fijo en la disputa entre Pouchet y Pasteur a mediados del siglo pasado.

En la China antigua, creíase que los áfidos nacían en los bambúes. De la suciedad y el calor, leemos en los libros sagrados de la India, surgen espontáneas las moscas; revela la epigrafía babilónica que el fango de los canales engendra gusanos. Para los filósofos griegos, la vida constituía una virtualidad más de la materia y, por tanto, era coeterna con ella. Tales enseñaba que los seres vivos procedían de un limo caótico mediante la acción del calor. En el fango marino buscaba su origen Anaximandro. En esa línea abundan otros presocráticos. En opinión de Demócrito el agua y la tierra humedecida eran fecundadas por los átomos de fuego y de la argamasa resultante se componían los organismos, que se extinguían cuando se disgregaban los átomos unidos.

Aristóteles introduce la forma espontánea en el marco más amplio de su teoría y modos de generación. La generación espontánea derivaba del elemento terroso e hídrico, mezclados; mediante la acción del "pneuma vital" se formaba una pella de materia orgánica inicial. Cuando los mimbres de partida era materia en descomposición se engendraban con mayor facilidad plantas, insectos y testáceos, los que en su opinión ocupaban la escala inferior de los seres. La teoría de la generación espontánea se adaptó a las diferentes interpretaciones de la composición última de la materia. Si Lucrecio rejuvenecía el atomismo de Demócrito, los Padres de la Iglesia hablaban de un poder matriz de la



George-Louis Leclerc (1707-1788)



Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829)

Tierra concedido por Dios. La filosofía medieval de la naturaleza se atuvo a la doctrina aristotélica.

La filosofía mecanicista del XVII echó por la borda cualquier referencia a entelequias y otras "fuerzas formativas" para reducir la explicación a "materia y movimiento". En plena Revolución Científica, J. B. van Helmont proclamaba todavía haber "observado" la generación espontánea de ratones a partir de granos de trigo y una camisa empapada en sudor. William Harvey siguió la evolución del huevo hasta su eclosión y la de embriones de vivíparos. Aunque sentenció que *ex ovo omnia*. no vio contradicción entre una generación por acoplamiento y una generación directa de gusanos e insectos.

René Descartes admite una generación espontánea, *sine semine vel matrice*, junto a una generación normal, *ex semine*, pensamiento que hay que interpretar en el marco de su explicación mecanicista de los fenómenos naturales, vida incluida. Pero no hemos de entender tal mecanicismo divorciado de su filosofía racionalista. Lo apunta Reinhard Lauth en *Descartes´s Konzeption des Systems der Philosophie*, un estudio que se apoya en el análisis de las *Regulae ad directionem ingenii*, el *Discours de la méthode* y las *Meditationes de prima philosophia*. En la correspondencia encuentra la interpretación precisa del hilo conductor de su doctrina. De un modo complementario, Franco Aurelio Meschini arroja cierta luz sobre la naturaleza distintiva de la vida en *Neurofisiologia Cartesiana,* libro centrado en la disputa entre discípulos y contrarios a propósito de la glándula pineal y las funciones a ella asociada.

Sostiene Descartes que la filosofía es conocimiento perfecto de todas las cosas que el hombre puede saber. En cuanto tal, ese saber debe deducirse de las causas primeras. Causas o principios que cumplirán una doble condición. Primera, que sean tan claros y tan evidentes, que el espíritu humano no pueda dudar de su verdad; segunda, que de estos principios dependan otros conocimientos. Según el contexto, los llamará nociones primitivas, generales, comunes, simples o primeras. El concepto de verdad es uno de esos conceptos primeros.

La verdad consiste en el ser y la falsedad en el no-ser, de suerte que la idea de infinito, comprendiendo todo el ser, abarca todo lo que hay de verdadero en las cosas. Pero es imposible pensar en algo cuya idea no se halle al propio tiempo en nuestra alma. Estos actos intelectuales no guardan similaridad alguna con los actos corporales. Aunque la mente esté unida al cuerpo, no se sigue que el alma esté distribuida por todo el cuerpo, pues no es de su naturaleza el ser extensa, sino sólo que piense.

¿Cómo incidirá el alma en las funciones corporales, al menos en las propias del cerebro? Descartes expone las líneas principales de su fisiología en *L'Homme*, *Discours de la méthode* y *La description du corps humain*. Al fundarla sobre bases mecanicistas, incrusta las sensaciones y el movimiento —léase circulación de la sangre y sistema nervioso— en la teoría del automatismo animal. Nos veríamos incapaces, anota, de distinguir un animal de un autómata, si éste apareciera revestido con pellejo

ces corps ont tous un même genre d'origine, des termes ~~à leur~~ durée, des besoins à satisfaire pour se conserver, et ne subsistent qu'à l'aide d'un phénomène intérieur qu'on nomme la vie, et d'une organisation qui permet à ce phénomène physique de s'exécuter.

c'est à ces corps singuliers et vraiment admirables qu'on a donné le nom de corps vivans; et la vie qu'ils possèdent, ainsi que les facultés qu'ils en obtiennent, les distinguent essentiellement des autres corps de la nature. ils offrent en eux et dans les phénomènes divers qu'ils présentent, les matériaux d'une science particulière qui n'est pas encore fondée, qui n'a pas même de nom, dont j'ai proposé quelques bases dans ma philosophie zoologique, et que je nommerai biologie.

c'est parce que la biologie n'est pas réellement fondée; et qu'on n'a pas même pensé à en faire un sujet d'étude particulière, qu'on voit tant de faux principes émis à l'égard des caractères des animaux et des végétaux, tant d'hypothèses inconséquentes relativement aux différens systèmes particuliers de l'organisation animale et aux phénomènes variés qui en résultent, enfin, tant de vues contraires à la marche de la nature, à l'égard des facultés qui ne sont que des phénomènes physiques.

Fragmento del manuscrito donde Lamarck introduce y define el término "Biología"

y plumas. Lenguaje y razón separan al hombre de la bestia. Pero al afirmar que los animales están privados de pensamiento "no niego la vida a ningún animal, puesto que establezco que la vida consiste en el calor del corazón".

Invitado a precisar su doctrina de la glándula pineal, el *konárion* donde residía el sentido común, no convence. Uno de los más críticos fue Nicolás Steno, quien corrige punto por punto la anatomía cartesiana del cerebro pasada por el tamiz de sus discípulos Clerselier y La Forge. En un famoso *Discours sur l'anatomie du cerveau*, Steno cree que Descartes fabula de intento. No era una disputa más. Amén del asiento de una glándula puente, entraba en cuestión la sede del alma, la unión del alma y el cuerpo, el alma de las bestias, la teoría de las sensaciones y, en definitiva, la reducción mecanicista de la vida.

Mientras Descartes se afanaba por buscarle un estatuto teórico a los fenómenos de la vida, el propio Steno, Van Horn y Regnier de Graaf seguían una vía más observacional. Descubrieron que los "testículos femeninos" de los vivíparos eran ovarios análogos a los de los ovíparos, y producían huevos que descendían hasta el útero por las trompas de Falopio. Importa menos que confundieran los huevos con los "folículos de Graaf". Por su parte, Francesco Redi demostraba en 1668 que los gusanos encontrados en la carne procedían de huevos dejados por las moscas y no de ningún proceso de corrupción. Apenas diez años después, Antoni van Leeuwenhoek encontraba "animálculos espermáticos" (espermatozoides). El advenimiento de un nuevo mundo, el reino de lo microscópico, pareció darle el golpe de gracia a la generación espontánea. Puro espejismo.

La teoría resurgió con fuerza de la mano de J. T. Needham, un convencido de la productividad infinita de la naturaleza. Se manifiesta partidario de la aparición espontánea de infusorios en sus *Nouvelles recherches sur les découvertes microscopiques et la géneration des corps organisés*. Tomó caldo de carne y, aún caliente, lo vertió en recipientes de vidrio que selló cuidadosamente. Para eliminar del líquido los posibles gérmenes que hubieran quedado, mantuvo los matraces algún instante sobre cenizas calientes. Los dejó luego a temperatura ambiente. Pasados cuatro días, el caldo bullía de animalillos. Para él, no cabía la menor duda de que existía una fuerza productora o vegetativa, capaz de originarlos. Lazzaro Spallanzani objetó que la esterilización era incompleta. Calentó las soluciones hasta una temperatura superior y mató todos los microorganismos, pero no pudo matar la idea de la generación espontánea microbiana.

Amigo de Needham fue Buffon, cuya biografía, completa y entusiasta, escribió en 1989 Jacques Roger, ahora traducida al inglés con el título de *Buffon. A Life in Natural History*. Excesos aparte —llamarle representante máximo de la Ilustración francesa y el mayor biólogo entre Aristóteles y Darwin—, Roger traza con sucinta parsimonia la evolución ideológica de Georges Louis-Leclerc (1707-1788).

Se siente cercano a las tesis materialistas. "Mucha gente cree que el alma es material, que el pensamiento es resultado de una organización particular, igual que el sonido." Le interesa todo lo cuestionable, fueran las radiaciones solares o la tensión y resistencia de los distintos tipos de madera. Extiende la ley newtoniana de la gravitación hasta el dominio de microfuerzas que organizan la materia a través de unos sellos o moldes interiores que gobiernan la generación del individuo, su nutrición y desarrollo, amén de la perpetuación de la especie. Se inspira en Bourguet, autor de unas *Cartas filosóficas sobre la formación de sales y cristales*. Crecen éstos, afirmaba, en una matriz líquida cuyas moléculas tienen la misma forma que las del cristal. Pero el desarrollo de un ser vivo requiere un mecanismo más complicado, pues deben asimilarse las moléculas empleadas. Ampliando el proceso a la generación, las moléculas asimiladas se conjugaban en los fluidos seminales de ambos sexos y formaban los elementos del embrión.

Buffon partía de la unidad del mundo vivo. Animales y plantas poseen propiedades comunes y exclusivas, que, como la organización y la reproducción, marcan una línea de frontera con lo inerte. La capacidad de multiplicarse le parecía tan determinante, que le bastaba para defender la equiparación en rango de animales

y plantas. Ambos estaban constituidos, en instancia última, por “moléculas orgánicas”. Estas, incorruptibles y primarias, tornaban a ser libres a la muerte del organismo, prestas para reagruparse en la generación de otro. Admitía una “fuerza penetrante” que integraba moléculas orgánicas en la matriz de los tejidos. Rechazaba la generación espontánea a partir de materia inerte y abogaba por la generación equívoca, la reorganización de las moléculas orgánicas capaces de formar gusanos parásitos.

En los años setenta y ochenta del siglo XVIII, muchos abandonan el mecanicismo para resaltar el carácter dinámico y creador del ser vivo, portador exclusivo de una fuerza llamada, según el contexto, *vis essentialis, Lebenskraft*, *sensibilité, materia vitae* o *Bildungstrieb*. No ha reflexionado sobre ello todavía, mejor contra ello, uno de los pioneros de la filosofía de la biología y protegido de Buffon, cuando publica *Flore françoise*. Nos referimos a *Jean-Baptiste Lamarck*, honrado recientemente en valiosa miscelánea. En 1793 se hizo cargo de la cátedra de “insectos y gusanos” del Museo de Historia Natural de París. La capacidad sistematizadora que había mostrado en trabajos botánicos precedentes se aplicará ahora a poner en claro este dominio, auténtico cajón de sastre. Lamarck establece los criterios de clasificación, paleontología y evolución de los invertebrados en *Histoire naturelle des Animaux sans vertèbres*.

Pone química en el corazón de sus lucubraciones sobre el ser vivo, con una curiosa inversión del orden: los minerales resultan de la descomposición de la materia orgánica. Para Lamarck todo lo que el hombre percibe, vida incluida, está regido por leyes de la física y, así, traduce los fenómenos de la sensibilidad e irritabilidad en los fluidos imponderables newtonianos del calórico y la electricidad.

El lamarckismo se ha convertido en sinónimo de doctrina de la herencia de los caracteres adquiridos. A partir de la materia y de fuerzas que le imprimen movimiento, el mundo orgánico ganó en complejidad creciente hasta la aparición de los mamíferos, con el hombre en su cúspide. No existen especies fijas, sino individuos. Pese a tal destronamiento de la especie, se esfuerza por apuntalar la nueva ciencia a la que acaba de bautizar, la biología. “Los cuerpos vivos ofrecen en ellos, y en los diversos fenómenos que los presentan, los materiales de una ciencia particular que todavía no está fundada, que ni siquiera tiene el nombre, de la que yo propongo algunas bases en mi *Philosophie zoologique* y a la que yo daría el nombre de biología.” Al considerar la vida un epifenómeno de la materia, abrirá el nuevo surco del organicismo, que él desea alejado por igual del vitalismo y del mecanicismo.

En respaldo de su doctrina transformista, la generación espontánea tiende un puente entre la naturaleza inorgánica y la orgánica. Si es probable que la vida nazca de un proceso fisicoquímico que desemboca en “organización”, una vez emergida pasa a ser un fenómeno mecánico. La controversia entre seguidores y adversarios alcanzó su apogeo a mediados de siglo. Félix Pouchet refrendó la teoría de la generación espontánea con resultados de experimentos que, en realidad, estuvieron contaminados por el aire entorno. Pasteur dio lo que pareció el golpe definitivo a la generación espontánea con un planteamiento experimental riguroso de esterilización. La vida sólo podía originarse a partir de vida preexistente.

Tras diversos intentos fallidos y mucho sesgo ideológico, la cuestión del origen de la vida recobró el pulso a raíz de la propuesta de Alexander Oparin en 1924: las moléculas orgánicas originarias aparecieron en una atmósfera primitiva dominada por metano. Stanley Miller sometió esa idea a verificación en el laboratorio. Expuso una mezcla de metano, amonio, hidrógeno y agua a descargas eléctricas y se formaron, entre otros compuestos, cuatro aminoácidos naturales. Ulteriores ensayos han elevado ese número a 17, aminoácidos obtenidos a través de la producción intermedia de cianhídrico y formaldehído. La síntesis de aminoácidos por descarga de chispas requiere mezcla de gas reductor con cantidades significativas de hidrógeno. Pero los geoquímicos se inclinan más porque hubiera una atmósfera no reductora, dominada por dióxido de carbono, y en esas condiciones no podemos esperar síntesis eficaz de aminoácidos.

Situación en la que nos introduce *The Molecular Origins of Life*, donde se integran los descubrimientos recientes en astronomía, planetología, paleontología, biología y química. Veintidós expertos nos explican el entorno y la atmósfera de la Tierra primitiva, la aparición de las moléculas orgánicas en el medio prebiótico y la formación de primitivos sistemas quirales capaces de replicación y evolución por mutación.

La vida, considerada como un sistema químico capaz de transferir su información molecular y evolucionar, demanda como primera condición la presencia de agua, que, en estado líquido, sólo puede persistir por encima de 0 grados centígrados y bajo

ORDRE présumé de la formation des Animaux, offrant 2 séries séparées, subrameuses.

[1] Série des animaux inarticulés.
[2] Série des animaux articulés.
Animaux apathiques.
Infusoires.
Polypes.
Radiaires.
Ascidiens.
Vers.
Epizoaires.
Insectes.
Idem sensibles.
Acéphales.
Mollusques.
Annelides.
Arachnides.
Crustacés.
Cirrhipèdes.
Id. intelligens.
Poissons.
Reptiles.
Oiseaux.
Mammifères.

La clasificación de los seres refleja la transformación histórica de los mismos

una presión atmosférica superior a los 6 milibares. La Tierra reúne las condiciones de tamaño y lejanía del Sol adecuados para mantenerla.

Las moléculas orgánicas de ese sistema químico constan de átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y fósforo. En principio, la información química primitiva pudo haber quedado fijada en cristales minerales, y Cairns-Smith no dudó en asignar esa misión a las arcillas. Siguiendo con su hipótesis, ciertas líneas moleculares desarrollarían una maquinaria fotoquímica que originaría polifosfatos y micromoléculas orgánicas, privilegiadas por la selección natural. Aparecerían polímeros orgánicos de composición monomérica específica: los polinucleótidos se replicaron y crearon un material genético menor, que demostró ser eficaz en la alineación de aminoácidos para la polimerización.

Günter Wächtershäuser asocia la clave de la vida con el omnipresente dióxido de carbono. La formación de pirita (FeS_2) a partir de sulfuro de hierro y sulfhídrico suministraría la energía necesaria para reducir el dióxido de carbono. La pirita tiene cargas positivas de superficie y se enlaza con los productos de la reducción del dióxido de carbono, dando origen a una química de superficie.

Los humeros de las profundidades marinas pudieron acunar el nacimiento de las primeras moléculas prebióticas. Y las nubes densas del medio interestelar. De particular interés para la química prebiótica tienen el cianhídrico y formaldehído que portan los cometas. Hasta un 5 % en peso de materia orgánica contienen las condritas carbonáceas. Se han identificado ocho aminoácidos de proteína en el meteorito de Murchison entre más de 70 aminoácidos. Según parece, en ese objeto celeste la L-alanina abunda más que la D-alanina. Pero quizá no sea la homoquiralidad actual una consecuencia de la vida, sino una exigencia para la misma. Todos los aminoácidos, salvo la glicina, existen en dos formas enantioméricas, L y D, aunque en las proteínas sólo se dan L-aminoácidos.

Las membranas primitivas que preservasen el material orgánico pudieron forjarse con simples terpenoides. En los sistemas contemporáneos, la información se almacena en los ácidos nucleicos, constituidos con bases púricas y pirimidínicas, azúcares y grupos fosfato. Pero, ¿qué mecanismo se empleó en la síntesis prebiótica de los nucleótidos? Lo ignoramos. Aunque se han obtenido purinas y pirimidinas en síntesis modelo, no es grano de anís lograr nucleósidos. Cierto es que, pese al magro rendimiento, se ha obtenido ya la síntesis de nucleósidos de purina, pero ninguna preparación todavía de un nucleósido de pirimidina.



Bioquímica de la contracción muscular. Enlace de la molécula de ATP

En favor de un mundo primero de ARN está el hecho de que el autoempalme y maduración de algunos intrones no precisan el concurso de enzimas peptídicas; los propios intrones actúan de moldes de polimerización. En los últimos años se ha potenciado la gama catalítica de estos ribozimas por evolución molecular dirigida. No obstante, puesto que la acumulación de nucleótidos en las condiciones prebióticos parece inverosímil, los químicos se inclinan a creer que la vida primitiva estaba constituida por moléculas informativas más sencillas: moléculas orgánicas y micelas.

Sobre el origen de la vida y otros temas básicos de la biología, su método y estatuto científico se reflexiona en *The Limits of Reductionism in Biology* y *Genetics and Reductionism*. Los participantes en la primera obra son biólogos profesionales. Sarkar es filósofo de la ciencia. Preguntarse sobre su trabajo o filosofar sobre la naturaleza de la biología es cuestionarse el reduccionismo, la fundamentación de la disciplina. Una reducción es una explicación que tiende puentes entre dos ámbitos o niveles de inquisición diferentes; el *explanandum*, lo que queremos explicar, procede de un ámbito y el *explanans*, de donde extraemos las razones justificativas, proviene de otro. Se trata también de explicar las propiedades del sistema por sus partes integrantes. La idea de reducción se halla incrustada en el propio concepto de ciencia. Maxwell y Boltzmann reducían las leyes de la termodinámica a la teoría cinética de los gases. Para el reduccionismo genético, el fundamento del fenotipo reside en el genotipo.

De la trabazón entre teorías se ocupó hace medio siglo Nagel. Para él, la reducción es una relación entre la teoría reducida (**T**1) y la teoría reductora (**T**2), una deducción lógica de **T**1 a partir de **T**2. Ambas teorías, **T**1 y **T**2, están formalizadas en lógica de primer orden y se requiere, además, un lazo de conexión, unas "leyes puente". Woodger se esforzó en llevar ese programa al dominio de la formalización biológica. Pero la formalización, estandarte del positivismo lógico, hubo de reconocer su incapacidad para abordar los contenidos de las teorías. Modificaciones ulteriores de Suppes, Sneed y Stegmüller reemplazan la lógica de primer orden por teoría de conjuntos. Pero no son las únicas propuestas. Algunas más radicales niegan hasta la posibilidad de reducción alguna.

El credo del reduccionismo filosófico tiene su primer artículo en la unidad de la ciencia; el segundo identifica la física con el espinazo del saber. Uniendo los dos admite el tercero una definitiva "teoría del todo", capaz de reducir la química a un caso especial de la física, la bioquímica a la química, la fisiología a la bioquímica, la psicología a la fisiología y, por ende, a la física. Sostiene el reduccionismo ontológico que todas las cosas constan, a la postre, de los mismos elementos; en coherencia con ello, el reduccionismo epistemológico admite unas leyes comunes y universales. Contra ese planteamiento labora el antirreduccionismo epistemológico; considerada nuestra limitada capacidad mental, declara, nunca llegaremos a la explicación última de los fenómenos complejos, aun cuando conociéramos las leyes que gobiernan los postreros constituyentes. El antirreduccionismo ontológico postula que ciertos fenómenos de orden superior, propios de sistemas autoreplicativos, se escapan

de los barrotes confinantes de la física subatómica.

Resulta muy difícil objetar la fecundidad de cierto reduccionismo gradual, que hinca en la química la explicación de buena parte de los mecanismos biológicos. Por lo demás, la adquisición de un conocimiento de un nivel profundo no excluye la interpretación de superficie; la teoría mendeliana de la herencia no se desvanece con el advenimiento de la genética molecular. Por muy extendida que esté la opinión de que sólo la física y sus leyes merecen el nombre exigente de ciencia, parece evidente que la complejidad dinámica tiene leyes propias y autónomas. Por evolución emergen en la naturaleza las propiedades funcionales, sin equivalencia en física. Funcionales son el ala, los ojos, un gen o un músculo y, sobre todo, la capacidad de autorreplicarse. Frente al determinismo físico, la selección natural sólo interviene si hay variabilidad, si hay información, si hay grados de libertad.

Al defender la autonomía de la biología, se aboga por la validez de las diversas explicaciones en torno a un mismo fenómeno, unas expresadas a través de la composición molecular y otras expresadas a través de su función. Los sistemas vivos constan de muchas variables en interacción, cuyos parámetros no están fijos. Lo que sucede en un tubo de ensayo puede ser lo mismo, lo opuesto o no guardar ninguna relación con lo que acontece en la célula viva, por no hablar del organismo en su medio. La fisiología estudia la contracción muscular; la bioquímica, los procesos moleculares que ocurren durante la contracción. La bioquímica de este proceso es bien conocida hasta pormenores muy finos. ¿Podemos reducir la fisiología a la bioquímica? Si el fin de ese proceder es proclamar que la bioquímica constituye la causa del acto fisiológico, estamos abusando del significado de causa. La causa es anterior al efecto. Pero en el movimiento muscular, el proceso bioquímico no *precede* a las contracciones musculares; *describe* la contracción muscular. Hablamos de cierta *identidad*, mas no absoluta: la función de la activación muscular adquiere sentido en la fisiología pero se halla ausente en la bioquímica de la actina y la miosina.

El reduccionismo llevado a sus extremos se degrada en ideología. Acontece así cuando se propugna la relación causal directa entre gen y comportamiento. Muchos esperan que el Proyecto Genoma Humano nos descifre el origen genético de la conducta criminal, la demencia o la inteligencia. No es la primera vez. La explicación genética de la conducta humana arraigó en el movimiento eugenésico de entreguerras. Con el recuerdo vivo de las secuelas del racismo, los trabajos sobre el determinismo genético, reanudados en los años cincuenta, prestaron atención al origen congénito de la anemia falciforme y la fenilcetonuria, enfermedades perfectamente caracterizadas en su bioquímica, pero se rechazó cualquier veleidad que afectara a comportamientos complejos, como la marginalidad y otros temas estelares de la eugenesia.

Hasta que el propio avance de la ciencia ha traído una atmósfera más tranquilizadora. Se apela de nuevo a los genes para la orientación sexual, la esquizofrenia, el autismo, el alcoholismo, las inclinaciones profesionales de la adolescencia y la competencia verbal o espacial. Pero al dogmatismo estadístico de los años veinte le han sustituido la cartografía de los loci, la secuenciación del ADN y la identificación de las proteínas expresadas. Y se es consciente de que carece de sentido atribuir determinismos genéticos cuando la interacción en el medio es tan condicionante.

LUIS ALONSO

Desarrollo

Constancia y variación

THE SHAPE OF LIFE. GENES, DEVELOPMENT, AND THE EVOLUTION OF ANIMAL FORM, por Rudolf A, Raff. The University of Chicago Press; Chicago, 1996.

Ernst Haeckel propuso en el siglo pasado su famosa ley biogenética: la ontogenia recapitula la filogenia. Era posible, de acuerdo con esta ley, reconstruir el árbol filogenético de una especie observando su desarrollo, si bien la condensación de algunos estadios impedía una reconstrucción completa. La aproximación al problema del desarrollo propuesta por Wilhelm Roux dotó a los biólogos de un diseño experimental que permitía una mejor comprensión del fenómeno, pero la conexión con la evolución quedó reducida o explícitamente excluida, y Haeckel olvidado. Algunos intentos posteriores para relacionar ambos campos no fueron fructíferos.

Rudolf Raff retoma el problema de conectar la biología del desarrollo, la genética y la evolución, a la luz de los últimos descubrimientos que permiten, por primera vez, comparar la expresión de los mismos genes en una gran variedad de especies. La similitud (o las diferencias) en el desarrollo pueden ahora expresarse en términos de regulación de la expresión génica, y los conceptos de homología o inducción, clásicos en estudios de la evolución o del desarrollo, respectivamente, toman una nueva dimensión. Pero, ¿pueden los nuevos métodos de la biología molecular explicar la variación de las especies en términos de su diferente desarrollo? Raff adopta una actitud entusiasta hacia las nuevas herramientas de la genética molecular, pero advierte asimismo sobre la necesidad de recurrir a métodos más “clásicos”. De hecho, en los primeros capítulos resalta la importancia del estudio de la filogenia para comprender las variaciones en el desarrollo de las especies y describe los elementos básicos para dicho estudio.

Como bien explica el autor, los caminos por los que los animales realizan su desarrollo son muy variados. Incluso especies similares pueden tener desarrollos tempranos muy diferentes. Como ejemplo, baste indicar los casos de desarrollo directo (sin fase larvaria) de ciertas especies de ranas o de erizos de mar. Esta variedad presenta una paradoja. Por una parte, los estudios moleculares y de expresión génica nos muestran una sorprendente conservación entre especies, de forma que genes similares realizan funciones parecidas en especies tan alejadas como la mosca y el hombre. Por otra parte hay una gran variedad no sólo entre los distintos planes corporales sino también en el desarrollo de especies similares. Si todo está tan conservado, ¿por qué los desarrollos son tan diferentes?

En varios capítulos aborda los diferentes temas que relacionan la genética, el desarrollo y la evolución. Los conceptos de homología, plan corporal, restricciones al desarrollo, heterocronía, estadio filotípico, etc., se explican con detalle y claridad. El libro constituye, pues, un material de gran valor para cuantos deseen profundizar en uno de los problemas más fascinantes: la constancia del desarrollo en las especies, y la variación de las especies en la evolución.

ERNESTO SÁNCHEZ HERRERO

Louis A. Bloomfield

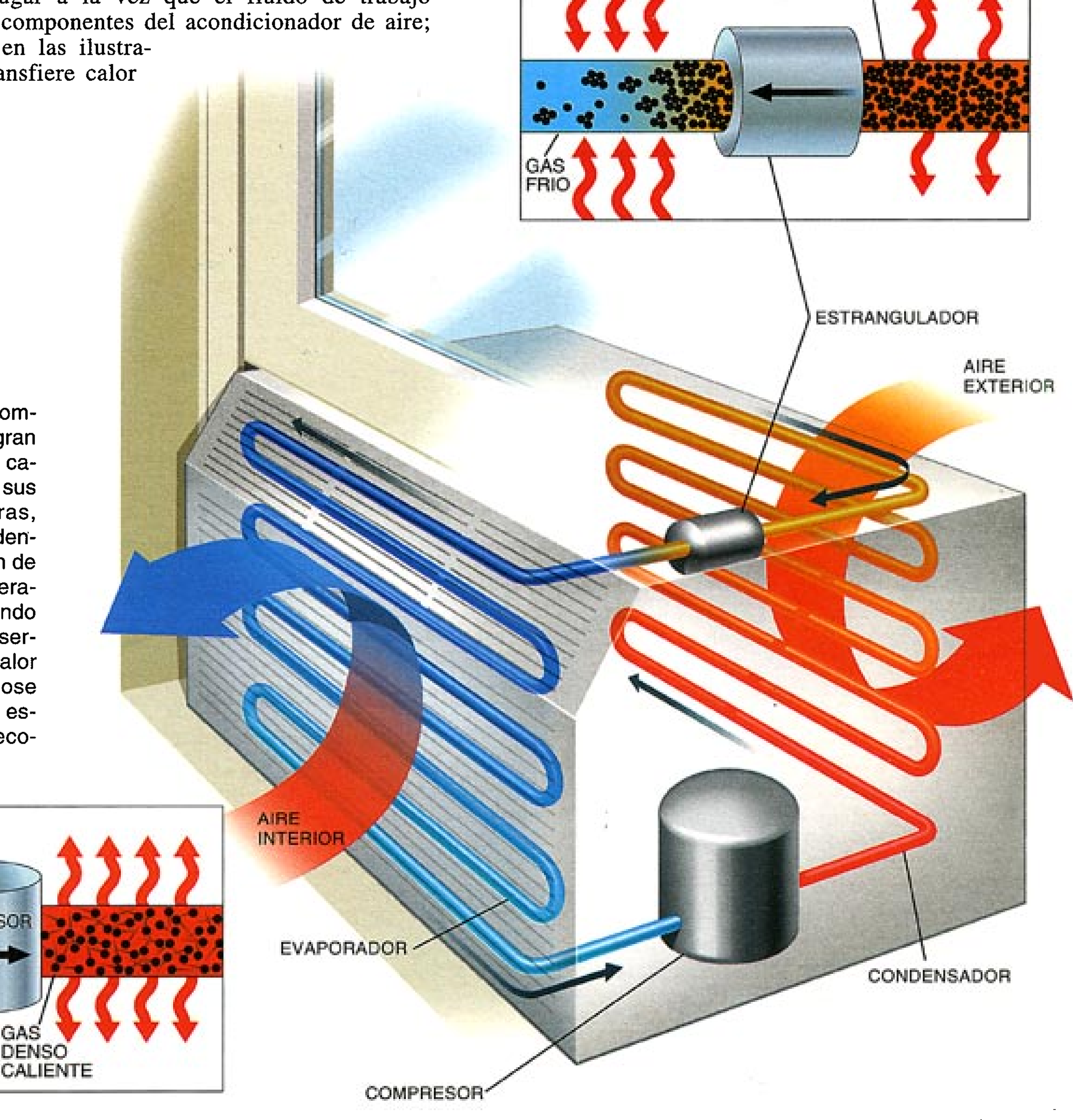
Acondicionadores de aire

La energía térmica, o "calor", fluye de lo caliente a lo frío. Por eso, nuestra habitación se calienta cuando aprieta el sol fuera. Los acondicionadores de aire desafían ese fenómeno natural y bombean el calor en sentido contrario, de la habitación al exterior. Para realizar ese trabajo se valen de un fluido de trabajo, sustancia química que cambia fácilmente del estado líquido al gaseoso y viceversa. El acondicionador de aire controla las fases del fluido de trabajo modificando presión y temperatura.

La superficie entre un líquido y un gas es siempre un lugar muy ajetreado; las moléculas van y vienen de un estado a otro. Cuando la densidad del gas es baja, del líquido salen más moléculas que regresan, y el líquido se evapora. Al revés, cuando la densidad del gas es alta, regresan al líquido más moléculas que lo abandonan, y el gas se condensa. Esos cambios de fase tienen lugar a la vez que el fluido de trabajo atraviesa los distintos componentes del acondicionador de aire; tal como se describe en las ilustraciones, ese proceso transfiere calor de un lugar a otro.

1 PARA SEPARAR LAS MOLÉCULAS de un líquido se requiere energía. Por eso, el fluido de trabajo absorbe calor procedente del entorno cuando se evapora de su estado líquido convertido en gas. La primera etapa de este proceso ocurre en el estrangulador, donde penetra el fluido de trabajo en forma de líquido denso. El estrangulador hace que disminuya la presión sobre el líquido, con lo que éste empieza a evaporarse cuando sale por el otro lado. (Al evaporarse los líquidos se enfrían; por esa razón, el fluido de trabajo se encuentra en enfriamiento rápido al emerger del estrangulador.) Luego, cuando recorre los tramos del serpentín evaporador, continúa evaporándose en forma de gas y absorbiendo calor de la habitación.

2 CUANDO EL GAS llega al compresor, ya ha absorbido una gran cantidad de calor y se habrá calentado. El compresor aprieta sus moléculas unas contra otras, aumentando la presión y la densidad del gas. Con la opresión de las moléculas, crece la temperatura del fluido de trabajo. Cuando ese gas caliente atraviesa el serpentín condensador, libera calor hacia el exterior, convirtiéndose en líquido. Llega por último al estrangulador, dispuesto a recomenzar el ciclo completo.



Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PLANETAS ERRANTES, por Renu Malhotra

Si nos fiamos de la observación, nada nos impediría creer en el movimiento perfecto y eterno de los planetas. Pero las noticias que vienen de los confines del sistema solar hablan de unas trayectorias singulares de Neptuno y Plutón.

REPARACION DE LA MEDULA ESPINAL, por John W. McDonald y el Consorcio de Investigación de la Fundación Christopher Reeve para la Parálisis

Antaño poco más que una esperanza infundada, parece ahora plausible cierto grado de restauración de las lesiones de médula espinal.

EL NACIMIENTO DE LAS MATEMATICAS SOCIALES, por Pierre Crépel

En el Siglo de las Luces, sabios como Condorcet trataron de aplicar las matemáticas al estudio del hombre y de la sociedad.

CAUSA ABIERTA A LAS PRUEBAS NUCLEARES VIRTUALES, por Christopher E. Paine

El brillante plan del Departamento de Energía de los EE.UU. para sustituir las pruebas nucleares por simulaciones informáticas en tres dimensiones descubre sus puntos débiles.

DEVOLVIENDO LA VIDA A *TYRANNOSAURUS REX*, por Gregory M. Erickson

La imagen popular nos pinta un Tyrannosaurus rex *ferozmente carnicero. La paleontología, que procede con menos fantasía, empieza a revelar aspectos inéditos de este dinosaurio sociable.*

DIENTES DE *TYRANNOSAURUS*, por William L. Abler

El análisis mandibular pone de manifiesto su idoneidad para rasgar la carne y romper huesos. Por si fuera poco, las bacterias tóxicas que se alojaran entre sus dientes darían el golpe de gracia a la víctima que hubiera resistido el ataque del reptil.

EMIGRACION MEXICANA HACIA ESTADOS UNIDOS, por Carlos G. Vélez Ibáñez

La población mexicana del sudoeste de los Estados Unidos es resultado de un largo proceso de migración y expansión demográfica que antecede a la creación de la frontera actual.

LOS CANTORES DE TUVA, por Theodore C. Levin y Michael E. Edgerton

Sometiendo a prueba los límites de la capacidad vocal, los cantores con la laringe pueden crear sonidos que no tienen relación alguna con la palabra y el canto. Portan dos líneas musicales simultáneas o sintonizan, por ejemplo, con una cascada.

